

# Modelado y Análisis de Turbinas Eólicas en un Entorno de Cosimulación Fluido-Estructura y Mecanismos Flexibles

Sabrina Montaña, Juan M. Gimenez, Frederic Cugnon, Paul Bonnet y Alberto Cardona



# | Agenda

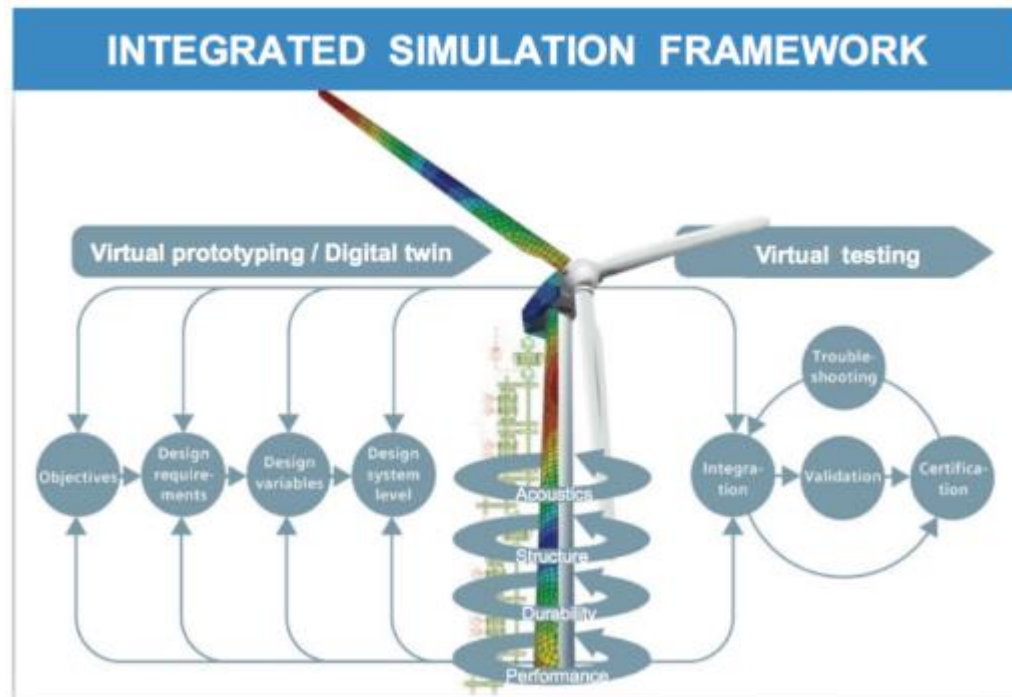
1. Introducción
2. Metodología
3. Resultados
4. Conclusiones

# 1. Introducción

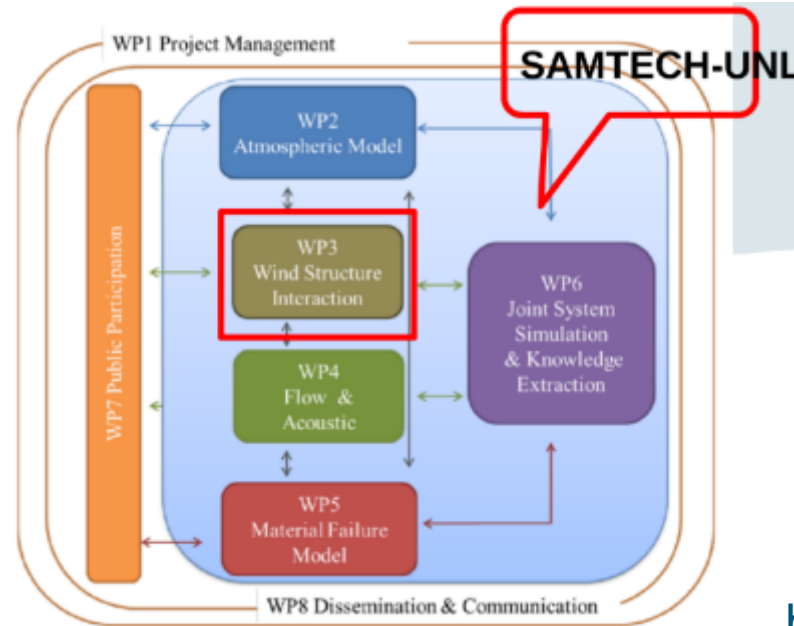
# Proyecto Upwards

## UPWARDS :

Desarrollo de una plataforma para diseño de grandes generadores eólicos considerando todos los aspectos que hacen a su funcionamiento



Simposio de Tecnología Aeroespacial y Nuclear 2022 | 2022-10-05



X-Plan  
Ingeniería Colaborativa



<https://www.upwards-wind.eu/>

Participant No	Participant organization name	Country
1	<a href="#">Stiftelsen SINTEF</a>	Norway
2	<a href="#">Fraunhofer Gesellschaft, (Fraunhofer Inst. for Industr. Math.)</a>	Germany
3	<a href="#">Samtech SA</a>	Belgium
4	<a href="#">AWS Truepower</a>	Spain
5	<a href="#">Wageningen University</a>	Netherlands
6	<a href="#">Siemens Wind Power AS</a>	Denmark
7	<a href="#">Aalborg University</a>	Denmark
8	<a href="#">Siemens Industry Software NV</a>	Belgium
9	<a href="#">Universidad Nacional del Litoral</a>	Argentina
10	<a href="#">Inst. von Karman de dynamique des fluides</a>	Belgium
11	<a href="#">WAVESTONE LUXEMBOURG S.A.</a>	Luxembourg



# Proyecto Upwards

X-Plan  
Ingeniería Colaborativa

Expert  
Partner

Digital Industry Software

SIEMENS



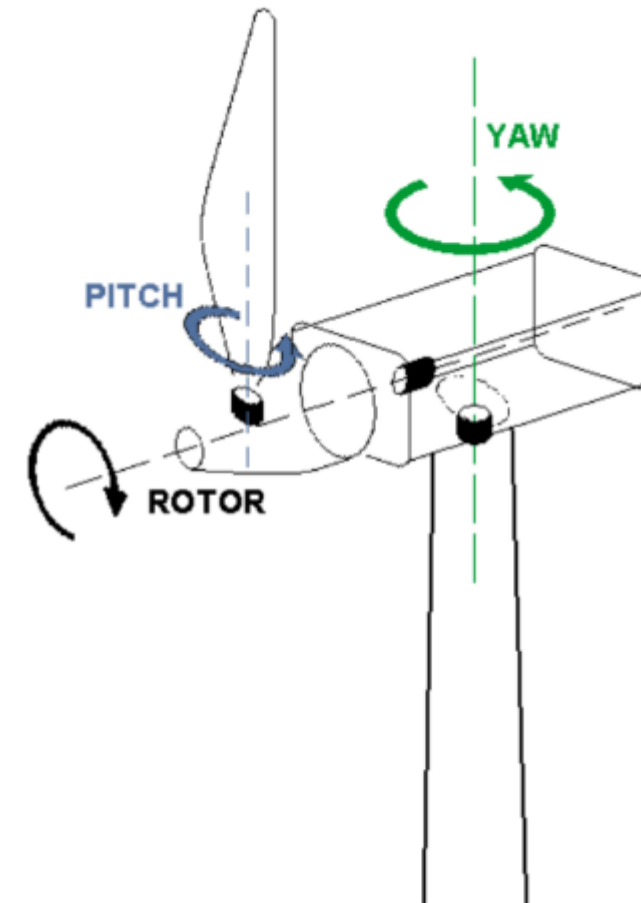
- Se resuelve la interacción fuerte entre fluido y estructura, considerando movimiento y deformaciones de la turbina eólica, mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) acoplada con Dinámica de Mecanismos Flexibles (FMD).
- Un modelo del parque eólico completo alimenta las condiciones de ingreso de flujo. Los resultados se usan para modelar la respuesta estructural para cálculo de tensiones en las palas, fatiga en el compuesto y dinámica del tren de transmisión.

# | 2. Metodología



## Sistema de Ecuaciones Diferenciales - Algebraicas (sistema DAE):

- Grandes desplazamientos y rotaciones finitas (no linealidades geométricas).
- Leyes constitutivas no lineales de los elementos deformables (no linealidades del material).
- Modelado del tren de transmisión.
- Control de la máquina.



# Dinámica Computacional de Fluidos: StarCCM+

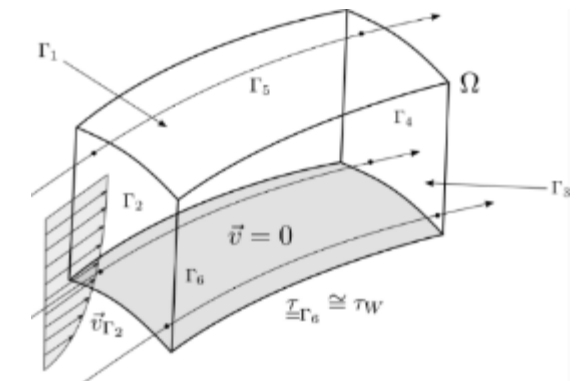
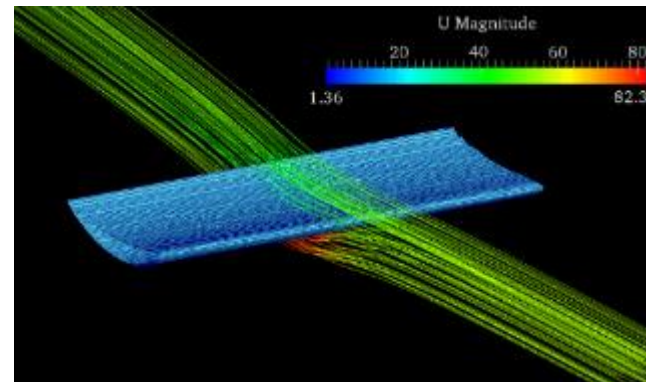
X-Plan  
Ingeniería Colaborativa

Expert  
Partner

SIEMENS

Digital Industries Software

- Flujo incompresible.
- Navier Stokes promediadas en ensambles URANS.
- Resolución método de los volúmenes finitos (PISO - SIMPLE).
- Discretización espacial esquemas de segundo orden
- Integrador implícito de Euler de primer orden
- Modelo de turbulencia realizable k-epsilon





# Co – Simulación: SCORE



Expert  
Partner

SIEMENS

Digital Industrial Software

Dos softwares especializados :

- Dinámica Multicuerpos Flexibles :  
**Samcef-Mecano**
- Dinámica de Fluidos Computacional :  
**StarCCM+**

- El análisis de una WT requiere la interacción de ambos: Co-simulación
- Los diferentes subsistemas se modelan y simulan de forma distribuida.
- Durante la simulación los subsistemas intercambian datos.

Aspectos :

- ✓ Aplicación
- ✓ Estabilidad de las soluciones
- ✓ Precisión
- ✓ Eficiencia

# Co – Simulación SCORE:



Expert  
Partner

Digital Industry Software

SIEMENS

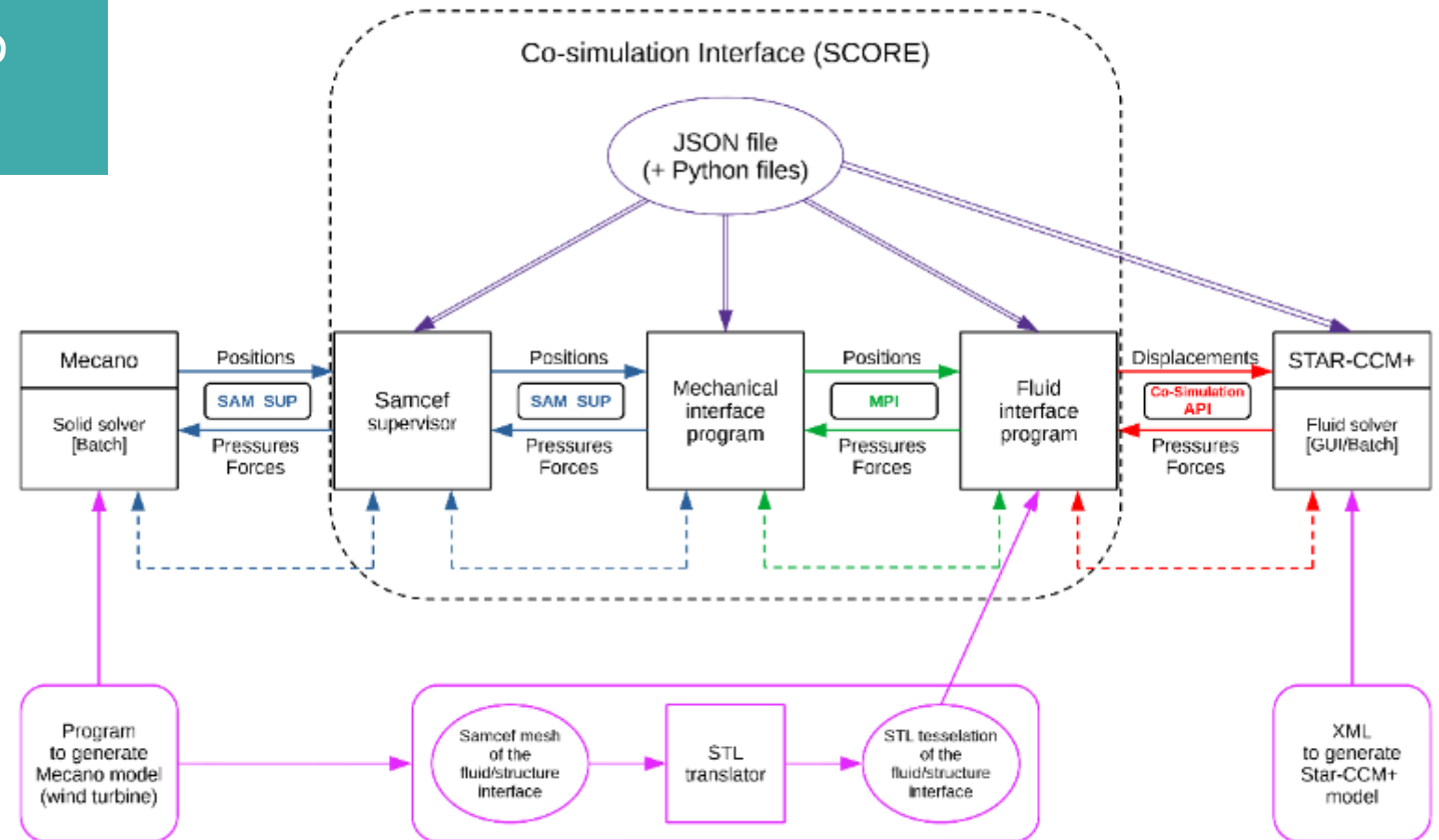
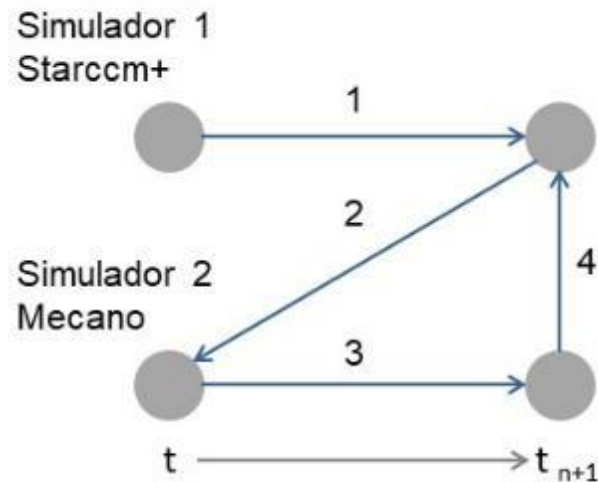
## SCORE: [S]AMCEF | Star-CCM+ [CO]-simulación [R]unning [E]nvironment

- Script para la ejecución automatizada de ejemplos de co-simulación
- Entrada general y estándar definida en formato JSON
- Varias opciones de configuración (ejecución en serie/paralelo, tareas previas y posteriores al proceso)
- Monitorización y sincronización de Mecano / Star-CCM+
- Integración de contenedores Docker

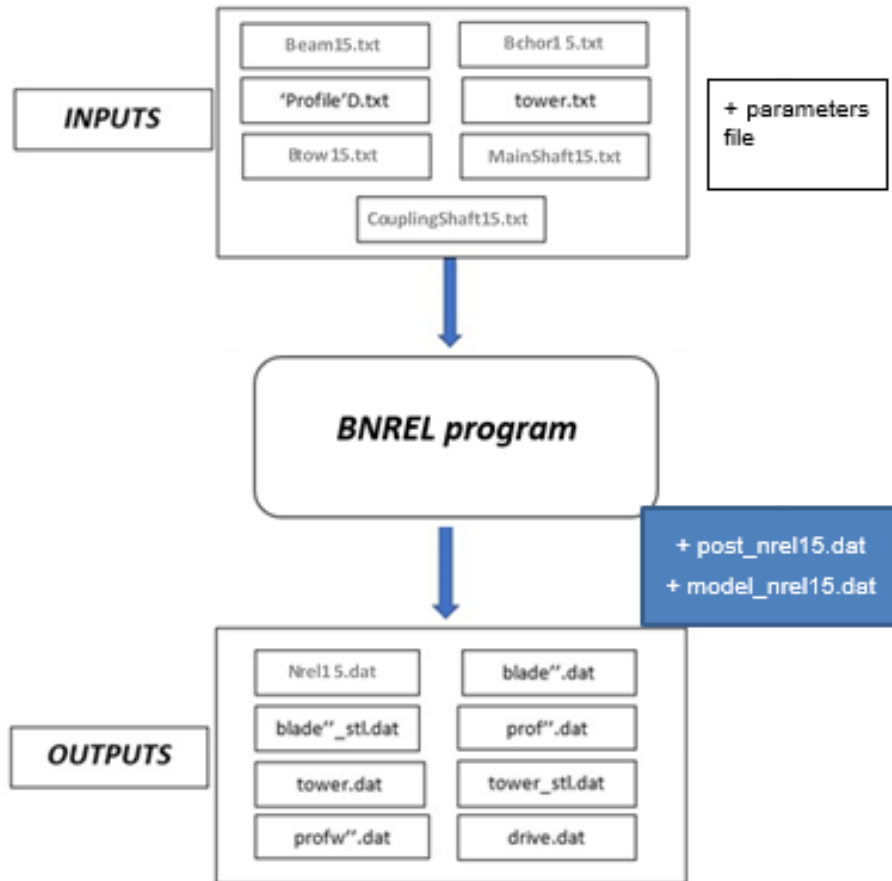
# Co – Simulación SCORE:

## SCORE:

- Algoritmo de interacción tipo Gauss-Seidel



# Modelado de la Turbina: BNREL



+ run scripts

```

itw (1 5MW, 2 2.3MW, 3 15MW, 4 Upwards_15MW)  ncompo (1-3 blades, 4 tower, 5 drive train)
4 5
nps (nb of blade sections)  np4 ( nb of tower sections)
49 11
iaero 1 mce aero 0 mesh for starccm or panel 2 both 3 dummy mesh without aero (dynam)
1
iwopt (wind option: 1 uniform winf)
1
itq (0 triangular mesh 1 quads)  inorm (1 normals point outside the blade/tower, 0 inside)
0 1
iriga (0/1/2/3/4, seen bnrel.f)  ica (1/0, positioning of N1 of MCE AERO)
3 1
iddl (1 user contro dll)  ise3d (force sensor at blade root)
1 1
iuni (0 mm t sec, 1 mks)
1
ibrake (0/1)
1
ihub (0/1)  inacelle (0/1)
0 0
vela (structural damping in blades)
0.05
prebend
2860
torque contro law (rot_speed) - 11 values
0. 0.5236 0.5617 0.6 0.638 0.6762 0.7143 0.7525 0.92 1 100
torque contro law (torque) - 11 values (MW)
0 7.8 9 10.2 11.3 12.6 14.1 15.0 16.3 16.3 16.3
extraction of blade section for WP5 (flag 0/1 , R1 , R2)
0 0. 0.
    
```

+ post-processing scripts

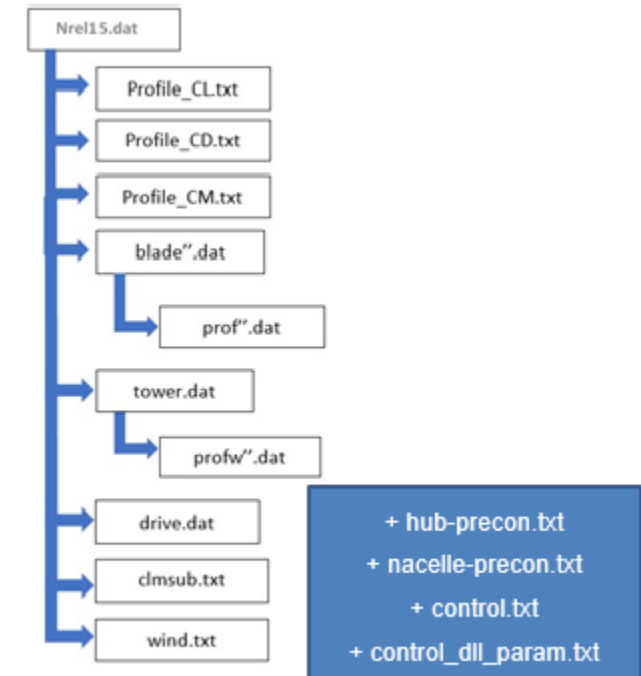
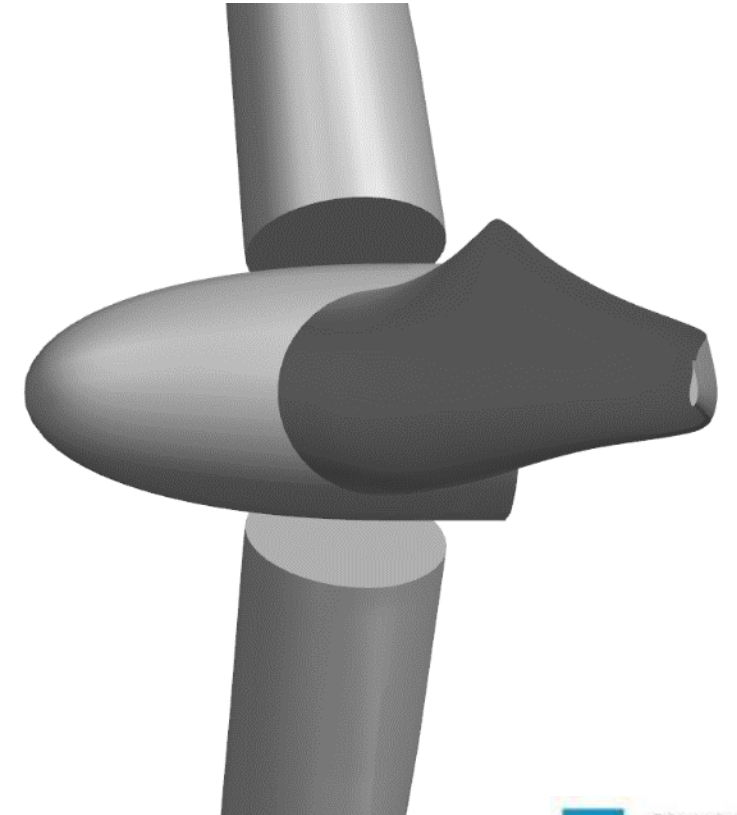
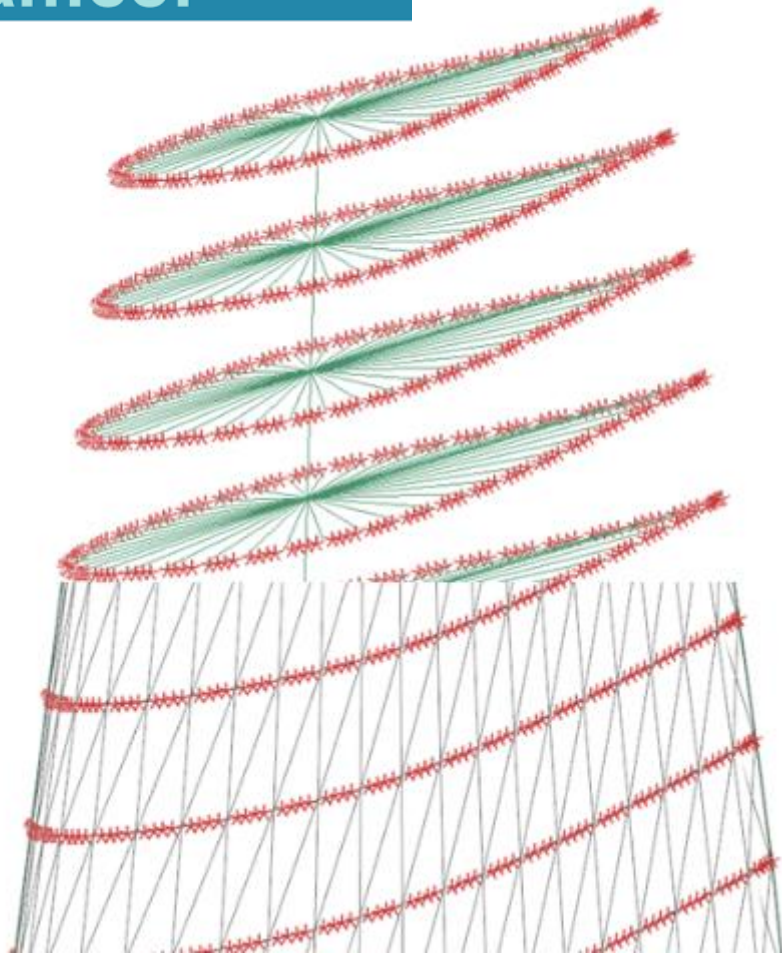


Figure 4: Model data structure

# Modelo Estructural

Simcenter  
Samcef



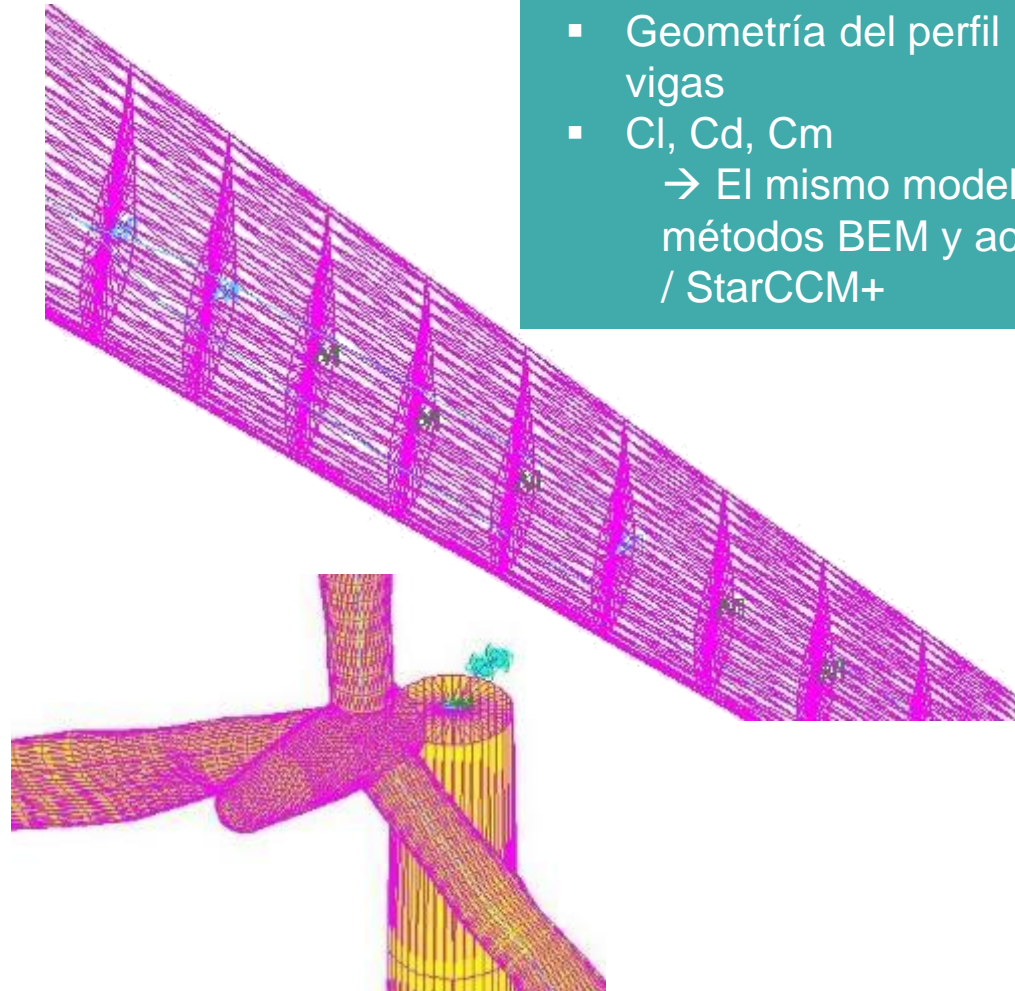
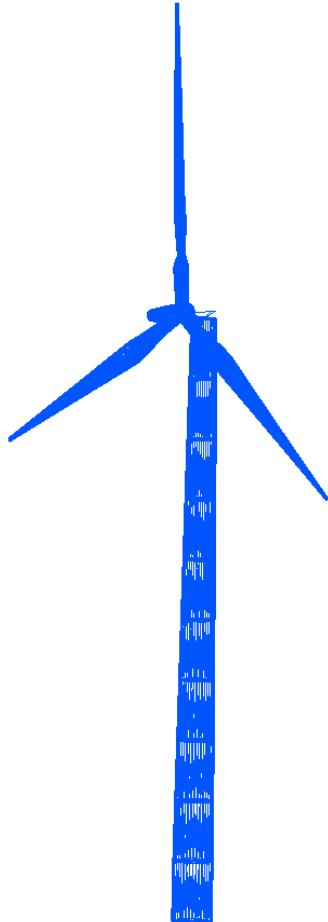
X-Plan  
Ingeniería Colaborativa

Expert  
Partner  
Digital Industry Software

SIEMENS

# Modelo Estructural

Simcenter  
Samcef



- Datos estructurales en vigas
- Geometría del perfil → piel conectada a vigas
- $C_l$ ,  $C_d$ ,  $C_m$   
→ El mismo modelo es usado para métodos BEM y acoplamiento Mecano / StarCCM+

- Eje flexible en el tren de mando
- Rotoidales, caja de velocidad, freno, generador
- Motores entre cubo (hub) y palas para control de pitch
- Controlador

X-Plan  
Ingeniería Colaborativa

Expert  
Partner

Digital Industry Software

SIEMENS

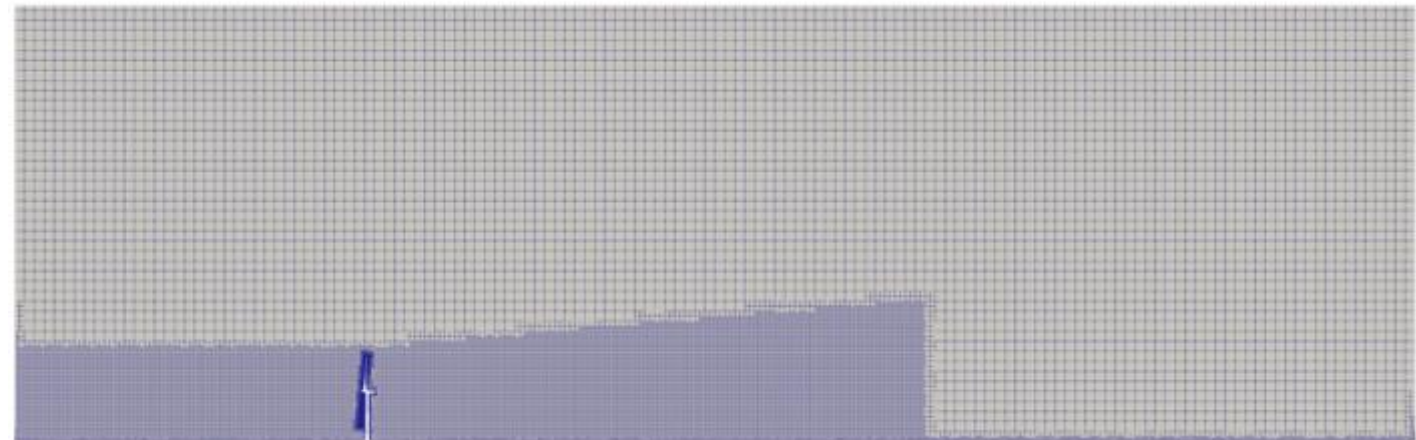
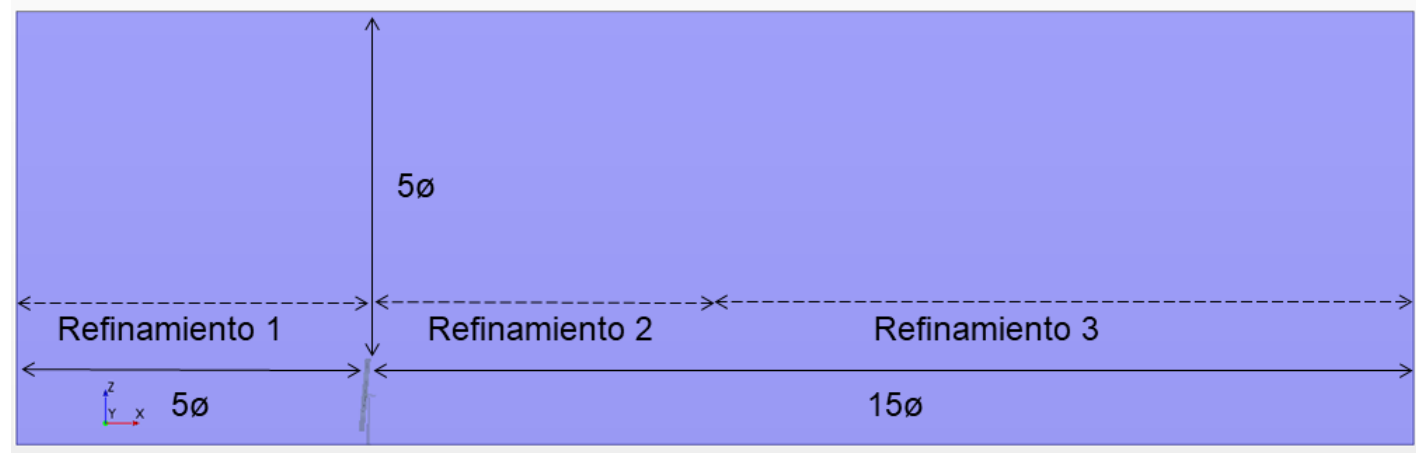


# Modelo Aerodinámico

STLs de geometría generadas por BNREL

Esquema de mallado:

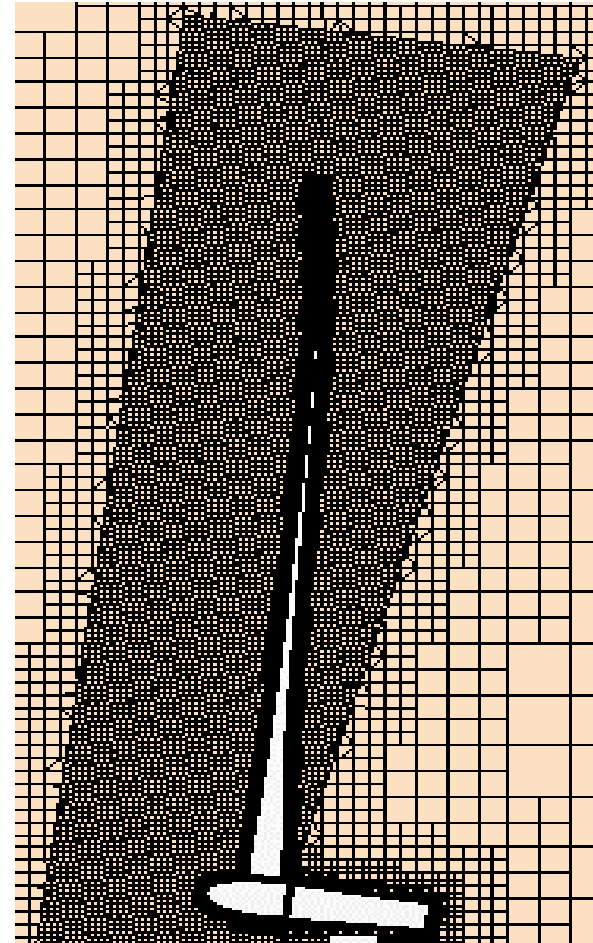
- Caja externa con malla fija.
- Malla giratoria solidaria del rotor, disco cónico con frontera deslizante con la caja externa.
- Malla deformable en interior del disco para seguir la deformación de las palas.
- Torre y góndola en malla fija.



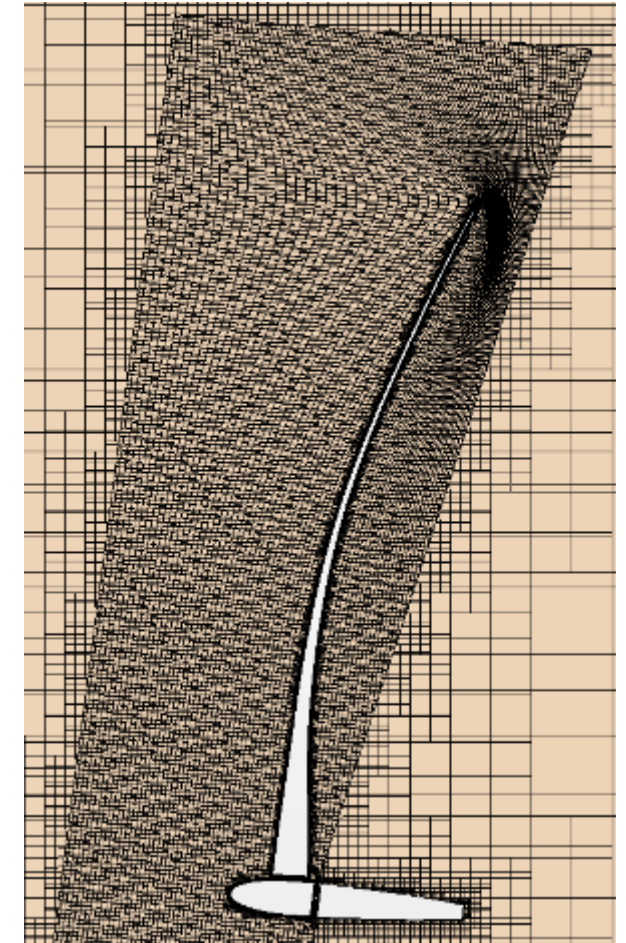
# Modelo Aerodinámico

- Rotación dada por el equilibrio entre el par producido por el fluido (presión y corte sobre las palas) y el par resistente → **Acoplamiento bidireccional**
- Tamaño de la celda en los álabes : 0.03 m.
- Tamaño medio de la celda en el disco: 0.4 m.

Malla inicial



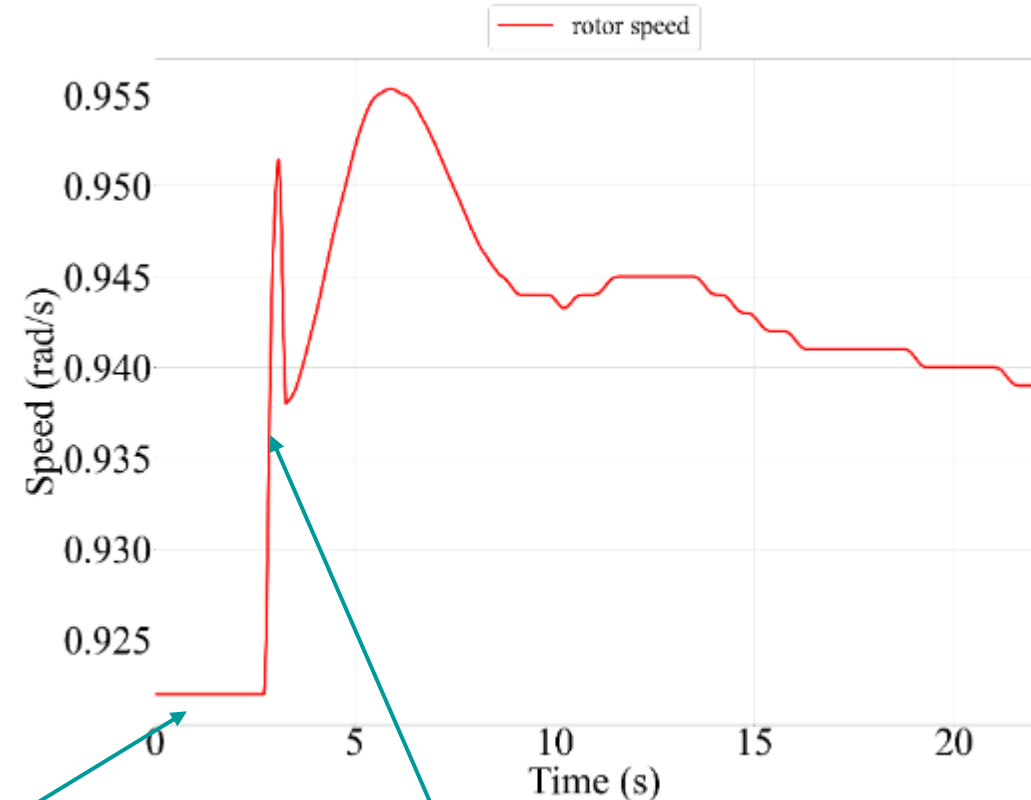
Malla deformada



# Estrategia de Arranque

## Etapas:

- 1) Co-simulación fluido-estructural con velocidad de rotación impuesta en el rotor y el disco; presión del viento aplicada progresivamente, desde cero hasta el valor real.
- 2) Co-simulación fluido-estructural con rotación calculada a partir del equilibrio entre la presión del viento sobre las palas y el par del rotor.



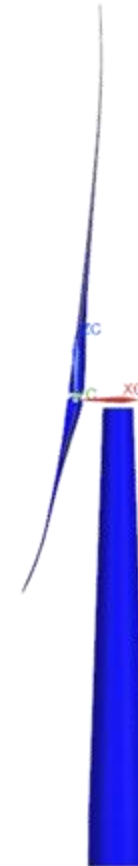
Etapa 1  
velocidad de  
rotación impuesta

Perturbaciones en el instante de  
liberación de la velocidad de rotación

# | 3. Resultados

# Siemens 15 MW

<b>Model</b>	<b>SWT 15MW</b>
<b>Number of blades</b>	3
<b>Blade length</b>	112 m
<b>Tower length</b>	150 m
<b>Prebend</b>	2860 mm
<b>Precone</b>	2.5°
<b>Tilt</b>	7.5°
<b>Model</b>	SWT 15MW
<b>Torque</b>	16300000 Nm
<b>Power</b>	15000000 W
<b>Speed</b>	8.8 RPM



Configuración inicial precurva



Configuración deformada

# Análisis

Se realizaron tres análisis:

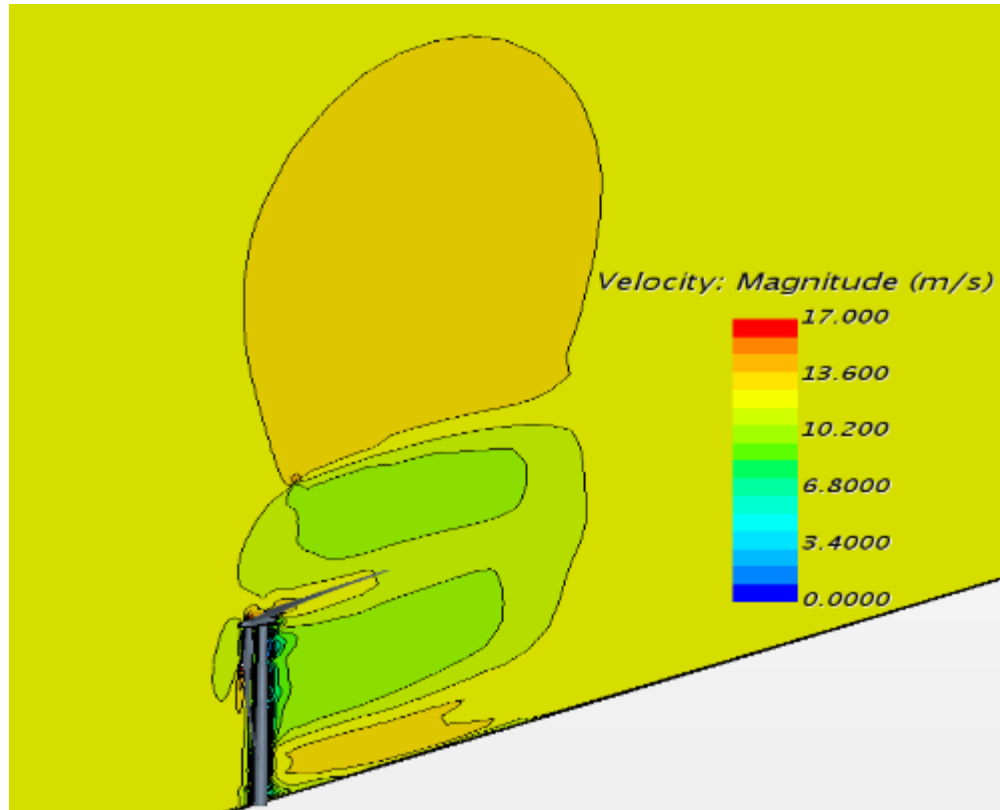
- 1) Viento constante 12,7 m/s.
- 2) Viento constante 15 m/s.
- 3) Viento variable :
  - Capa límite atmosférica (ABL) variable en el tiempo.
  - Perfil medio de terreno "suburbano" con 15 m/s a altura del rotor.
  - Serie temporal, con intensidad turbulenta  $I=0,15$ , generados por TurbSim.
  - Condición inicial por advección del perfil de velocidad sobre el dominio.
  - Entrada de datos en Star-CCM+ mediante *userlib* especial.

Co-simulación en cluster:

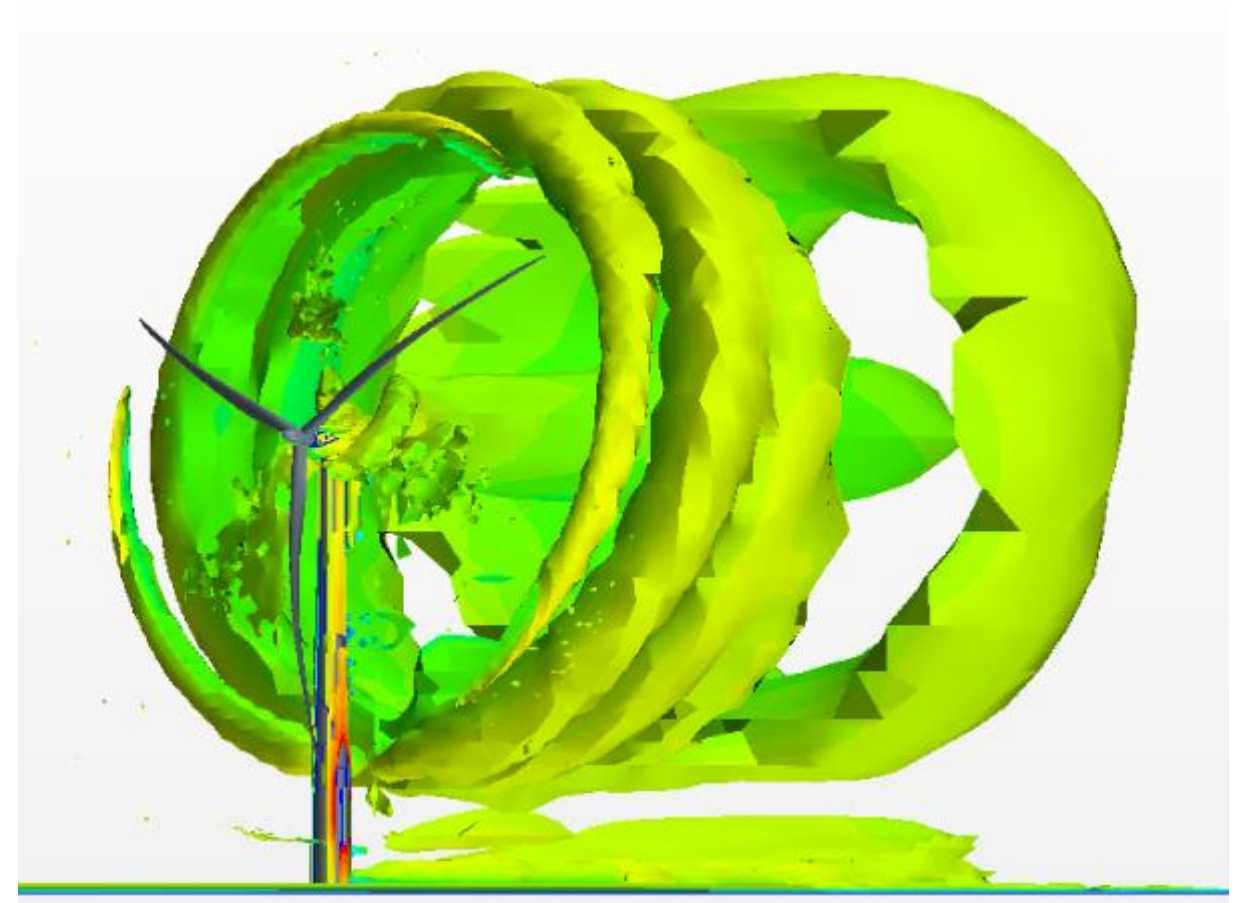
- Mecano serial (1 proceso)
- StarCCM+ con 64 procesos.
- Tiempo total de simulación 22 s, con un paso de tiempo de 0,01 s
- Una iteración de co-simulación de Mecano - Starccm por paso de tiempo
- Cinco iteraciones de fluido por paso de tiempo



# 1) Viento constante 12,7 m/s



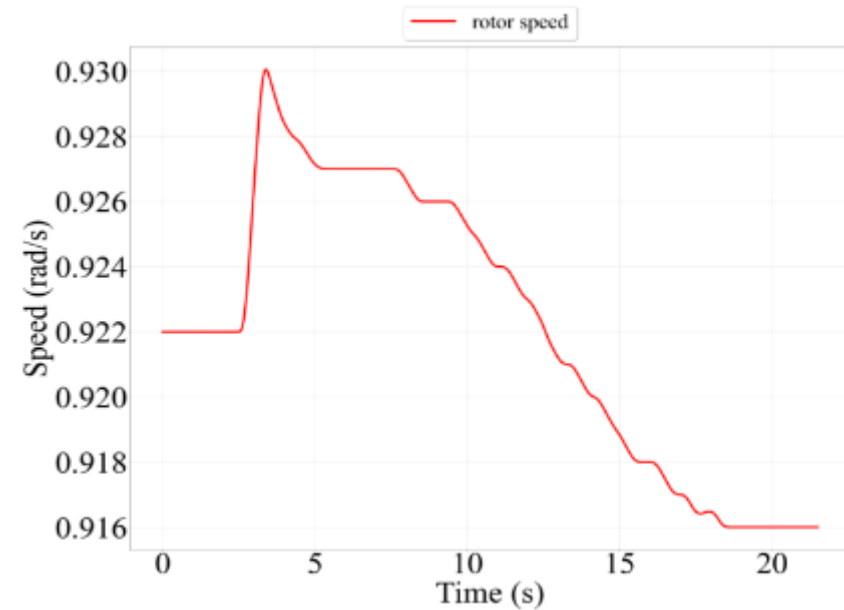
Snapshot of the velocity field at 22 s (XZ plane).



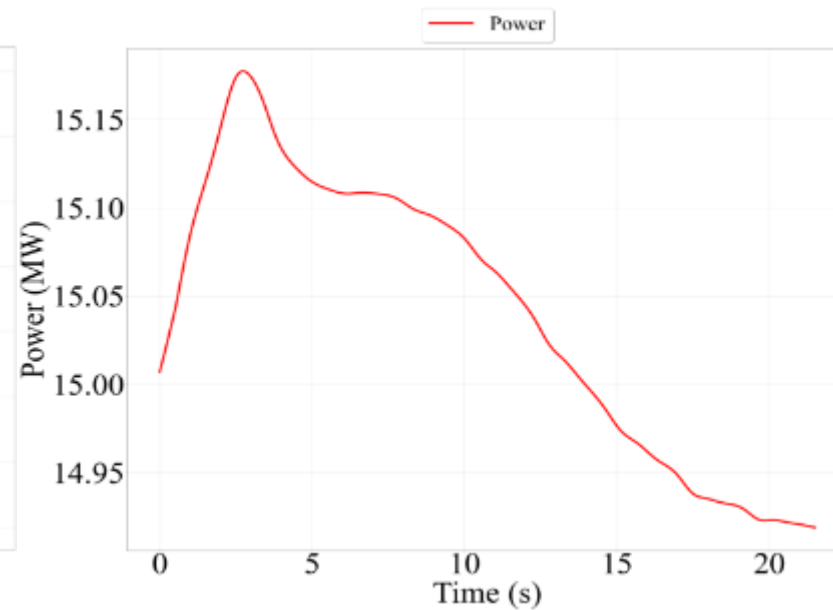
Detail of turbulence structure (Q criterion) induced by WT

# 1) Viento constante 12,7 m/s

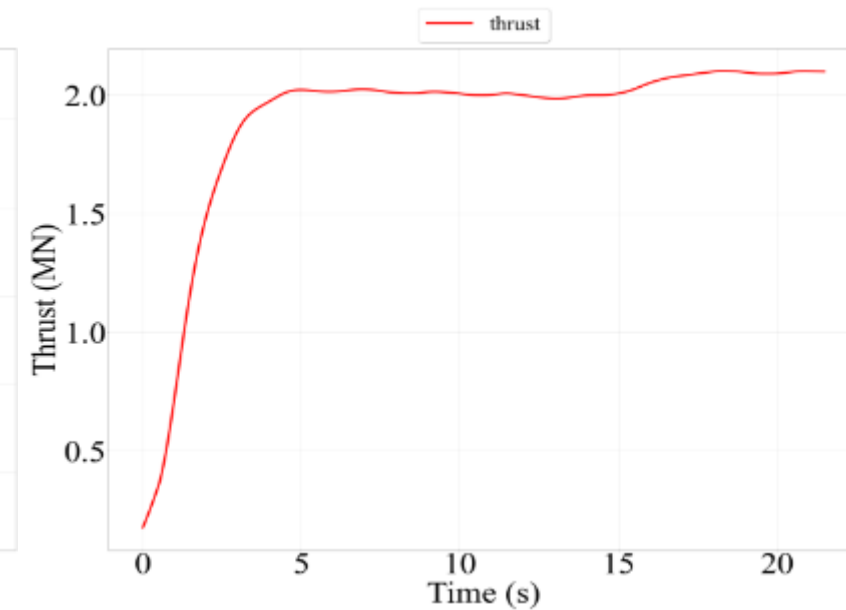
Velocidad del rotor 8,8 rpm - Funcionamiento estable - Objetivo 0,921 rad/s / Calculado 0,916 rad/s



Rotor speed



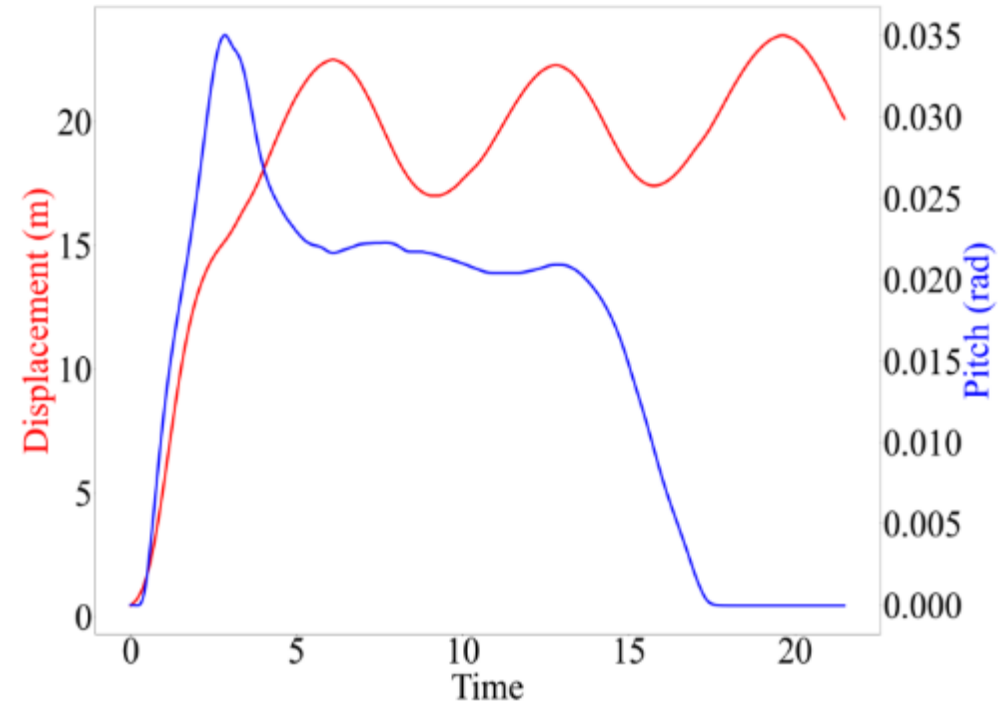
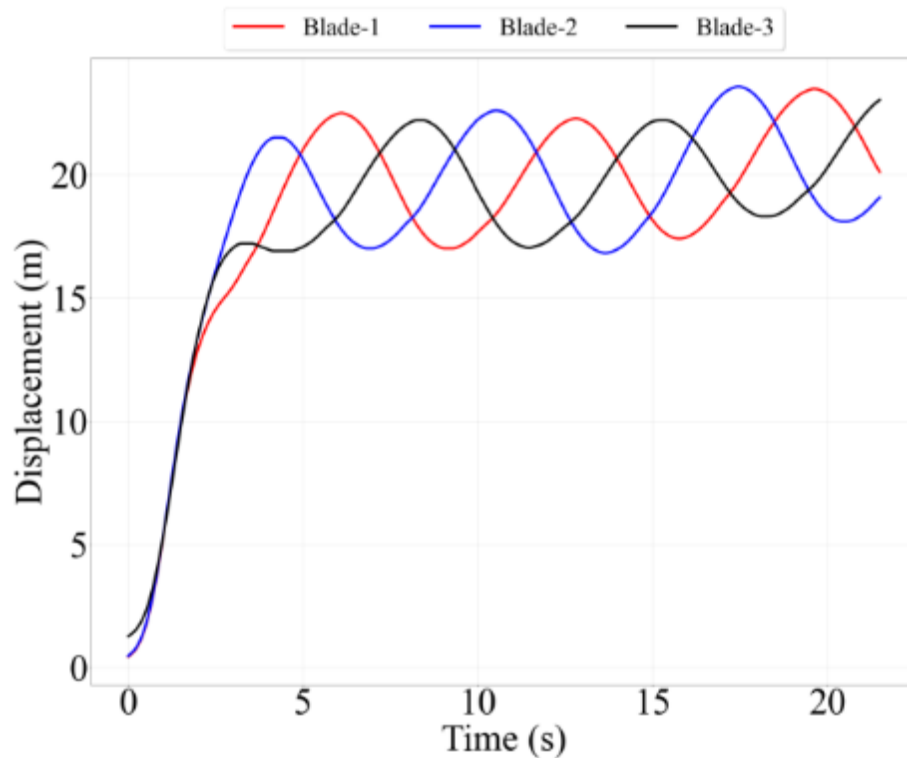
Power



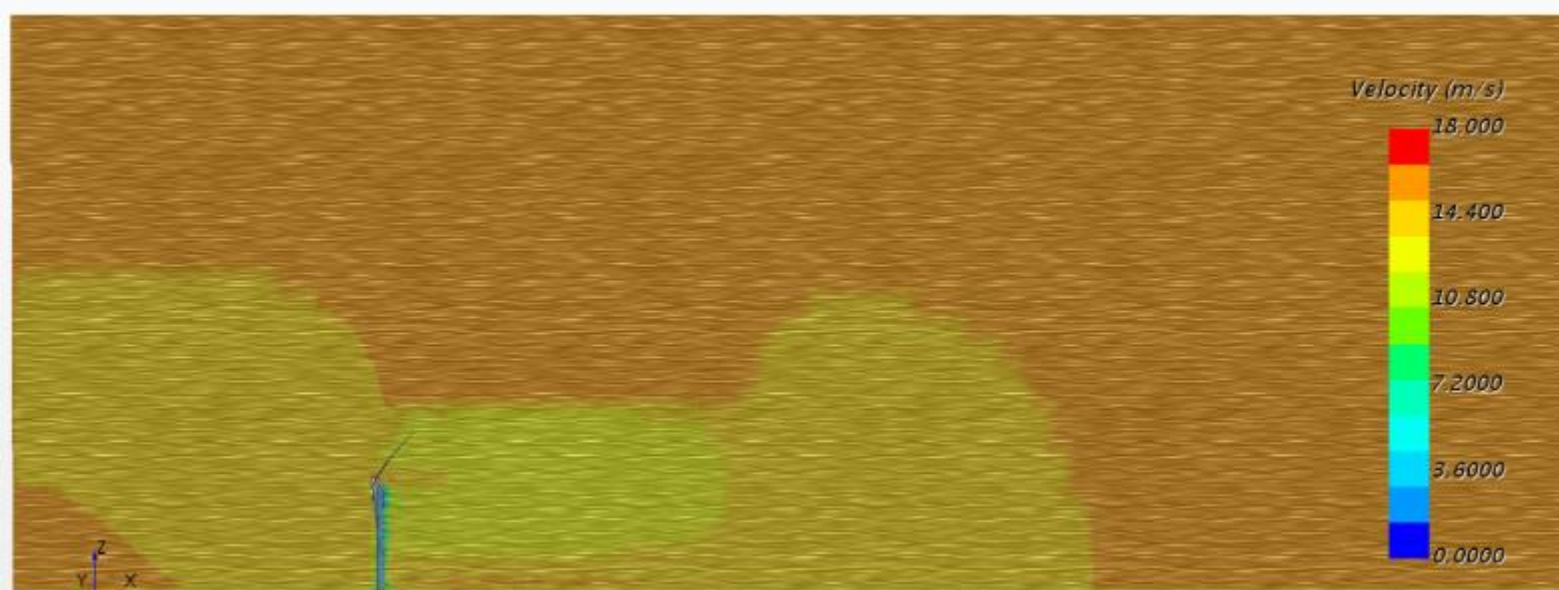
Thrust

# 1) Viento constante 12,7 m/s

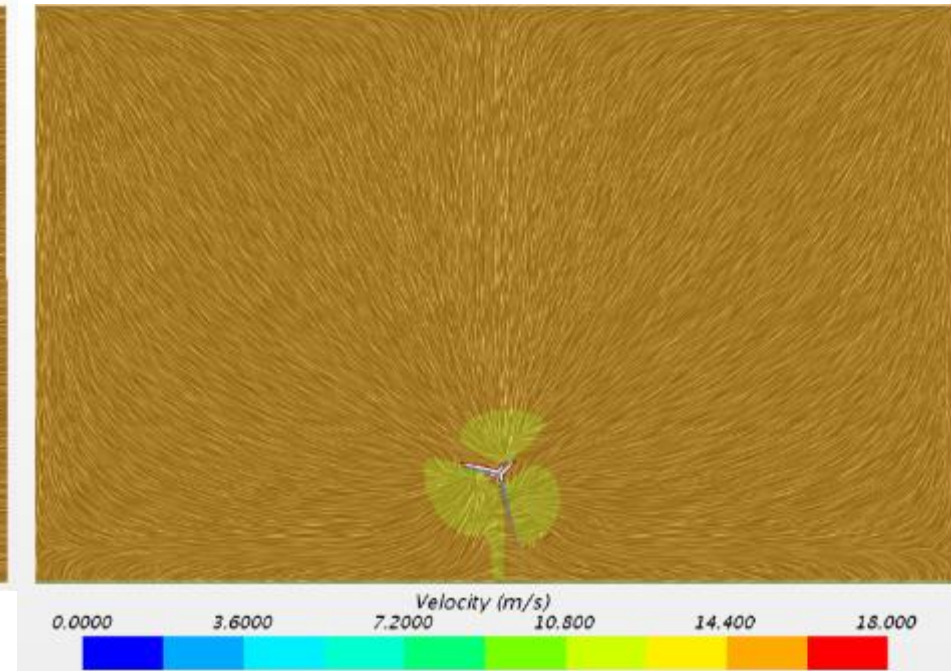
- Ángulo de pitch: 0 grados (fijado por el control). Condición de máxima demanda estructural.
- Palas deformadas por la presión del viento y la gravedad. Desplazamiento máximo de la punta 24 m.
- Patrón de desplazamiento aproximadamente uniforme y periódico



## 2) Viento constante 15 m/s

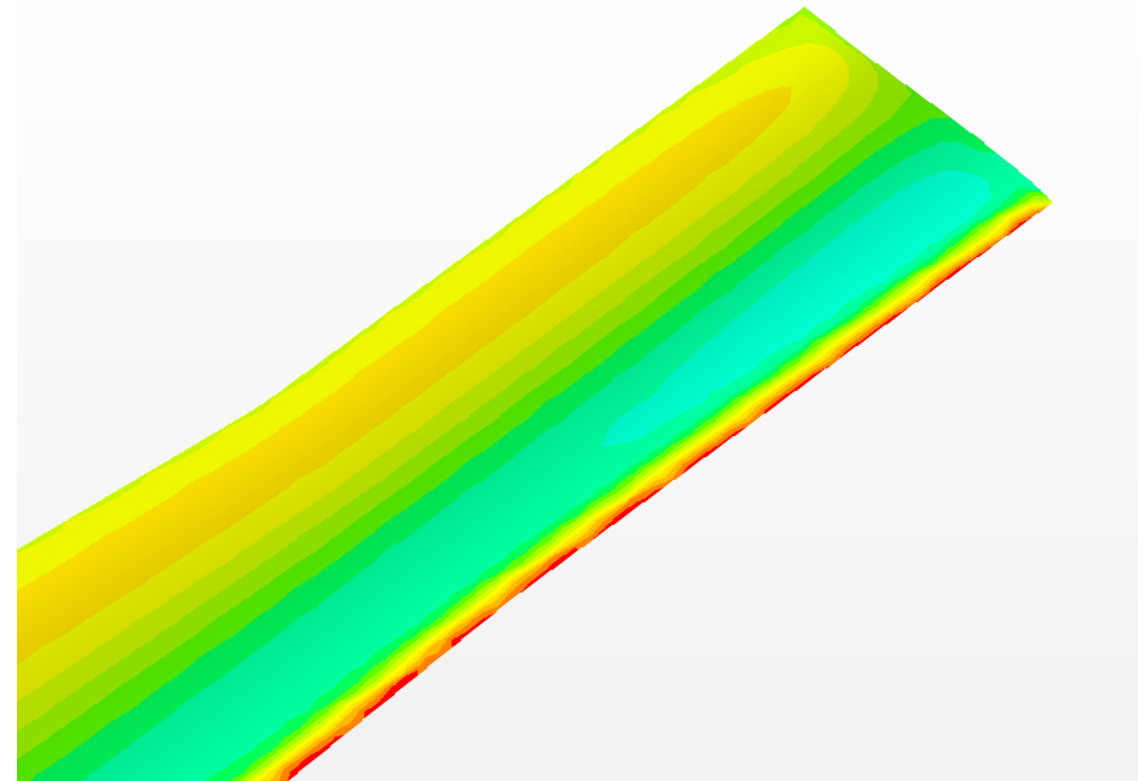
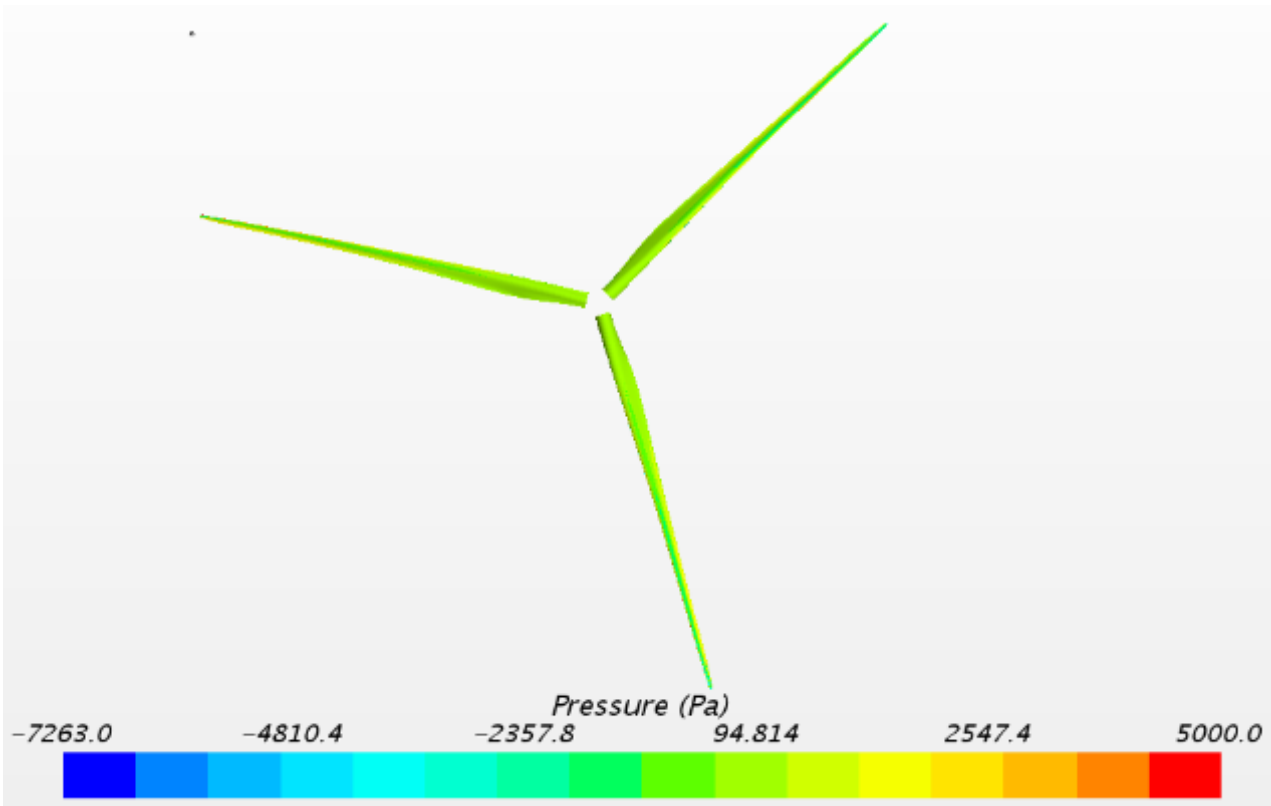


Snapshot of the velocity field (lateral view).



Snapshot of the velocity at WT position (front view).

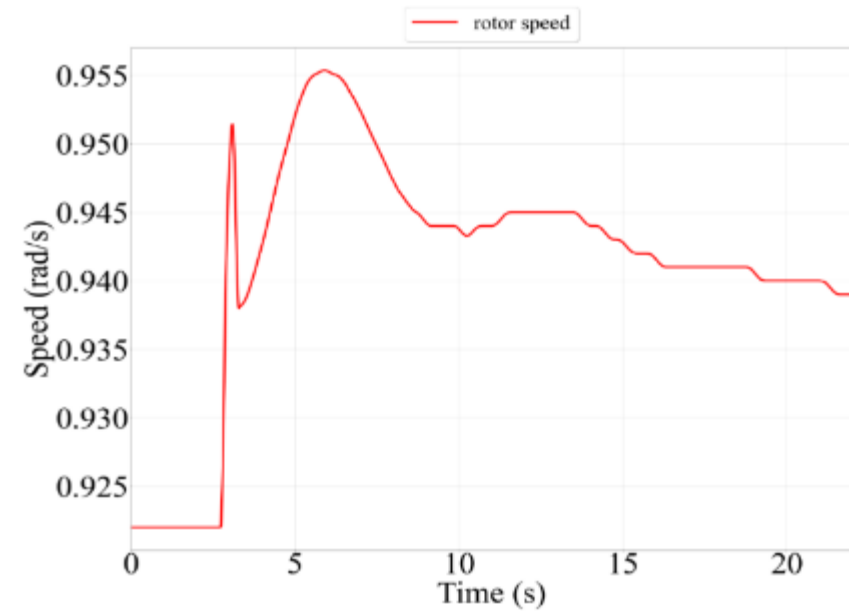
## 2) Viento constante 15 m/s



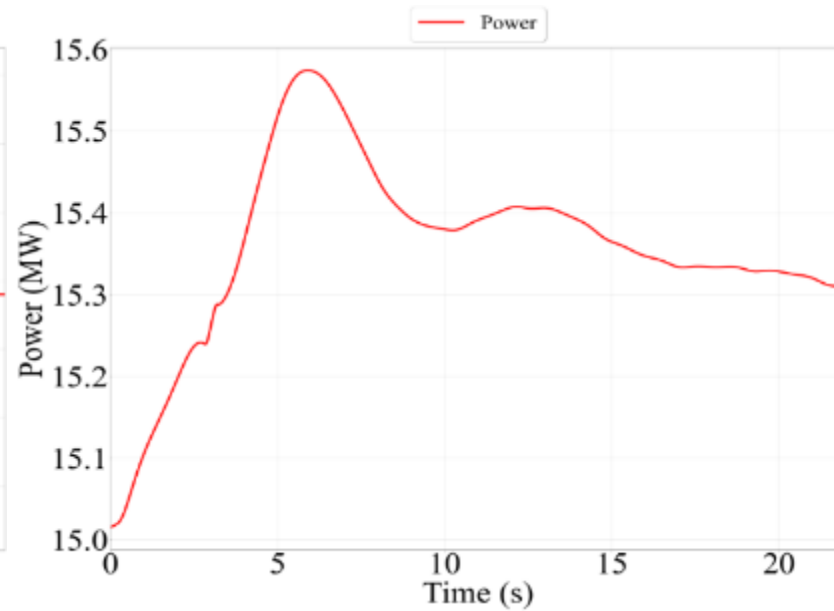
Snapshot of pressure field over blades (zero at outlet)

## 2) Viento constante 15 m/s

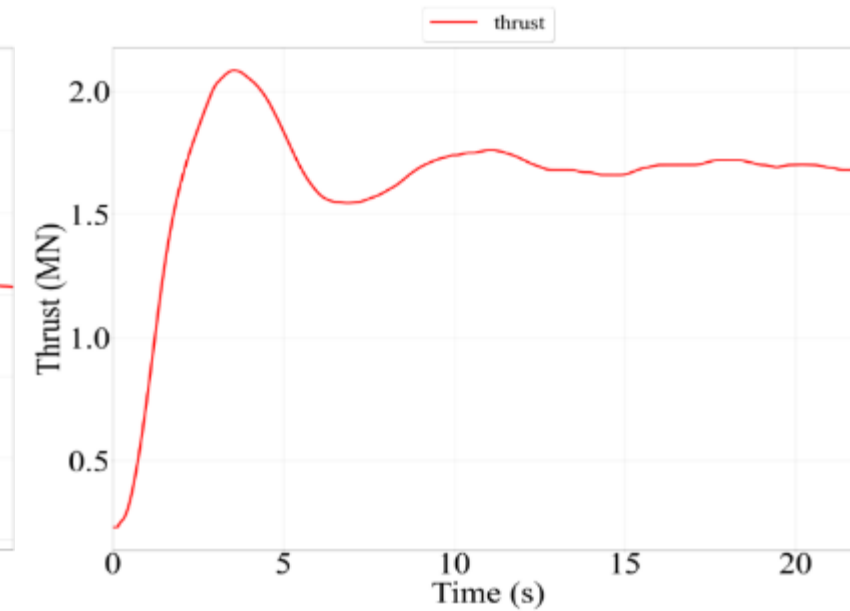
- Velocidad del rotor 9 rpm



Rotor speed



Power

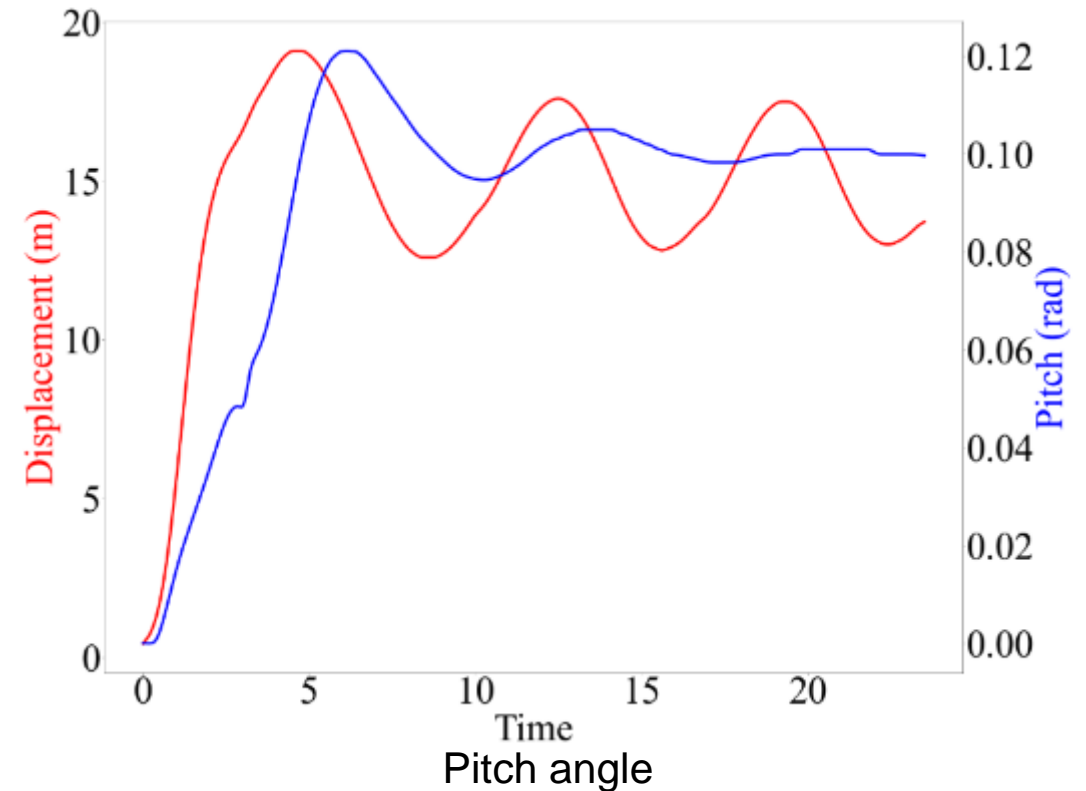
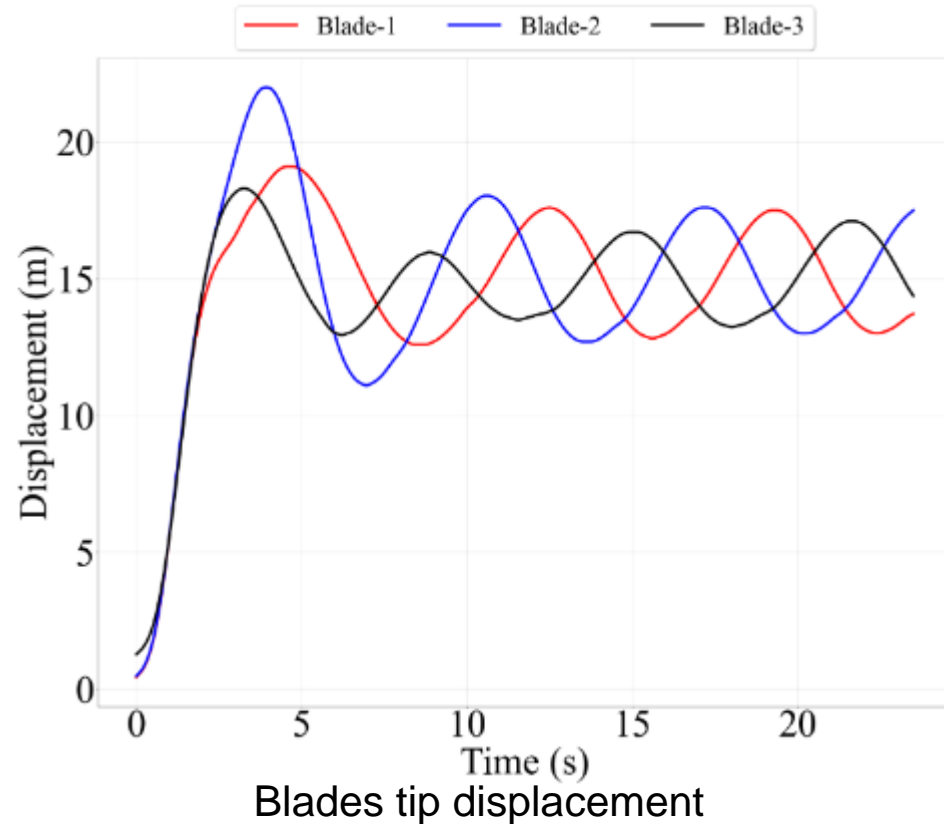


Thrust

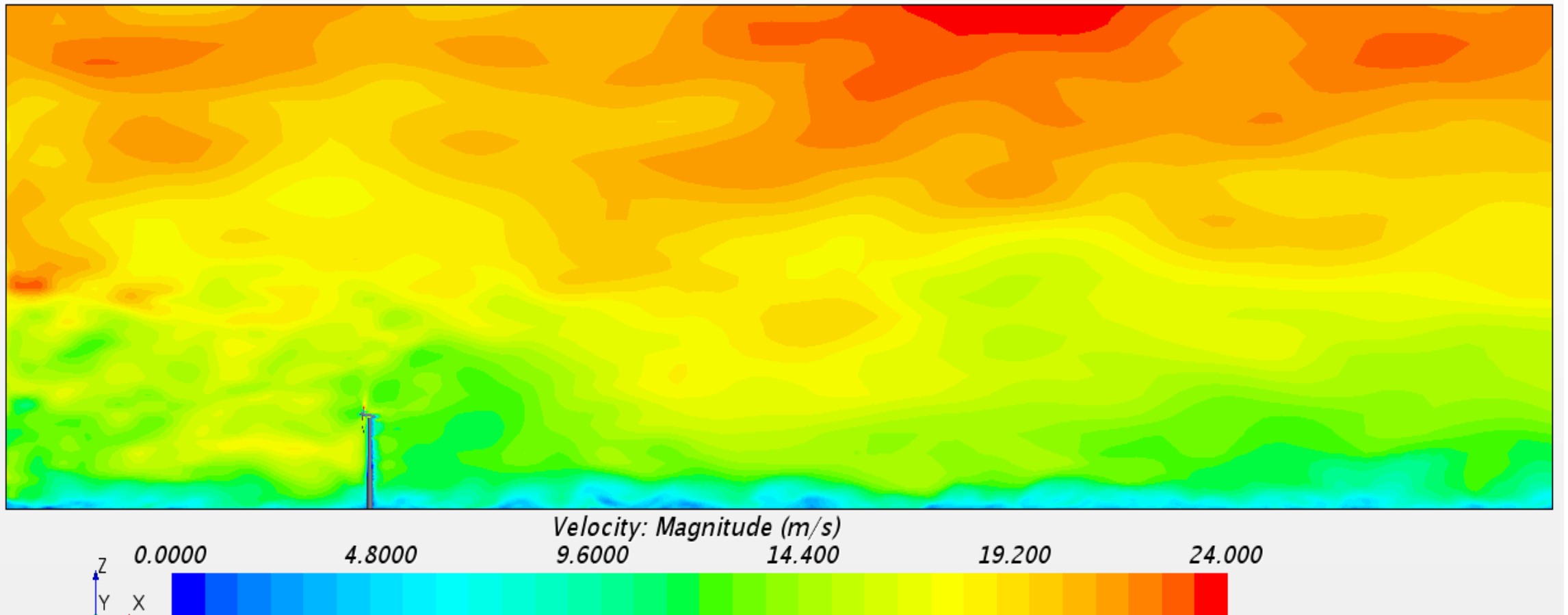


## 2) Viento constante 15 m/s

- Ángulo de pitch: 5,7 grados (fijado por el control).
- Palas deformadas por la presión del viento y la gravedad. Desplazamiento máximo de la punta 15 m.
- Se observa un patrón aproximadamente uniforme y periódico.

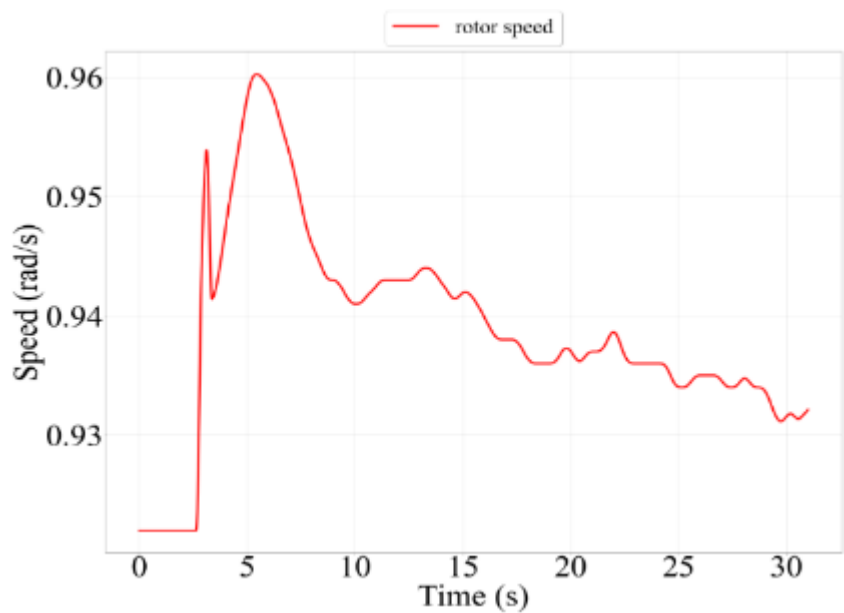


### 3) Viento variable 15 m/s

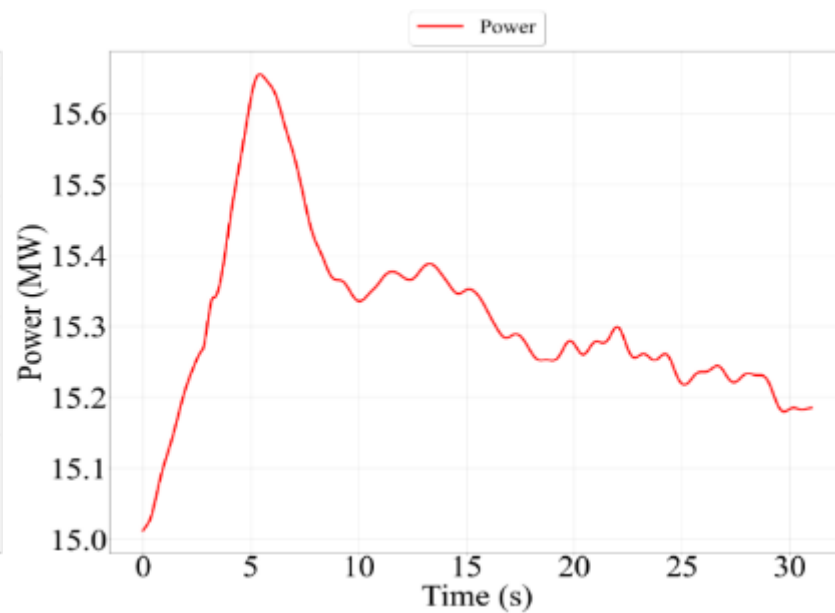


Snapshot of the velocity field (lateral view).

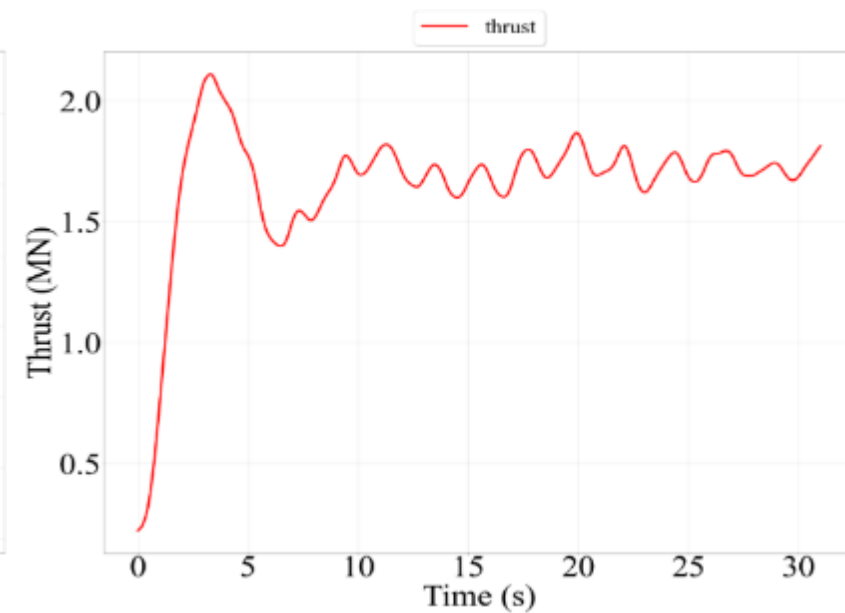
### 3) Viento variable 15 m/s



Rotor speed



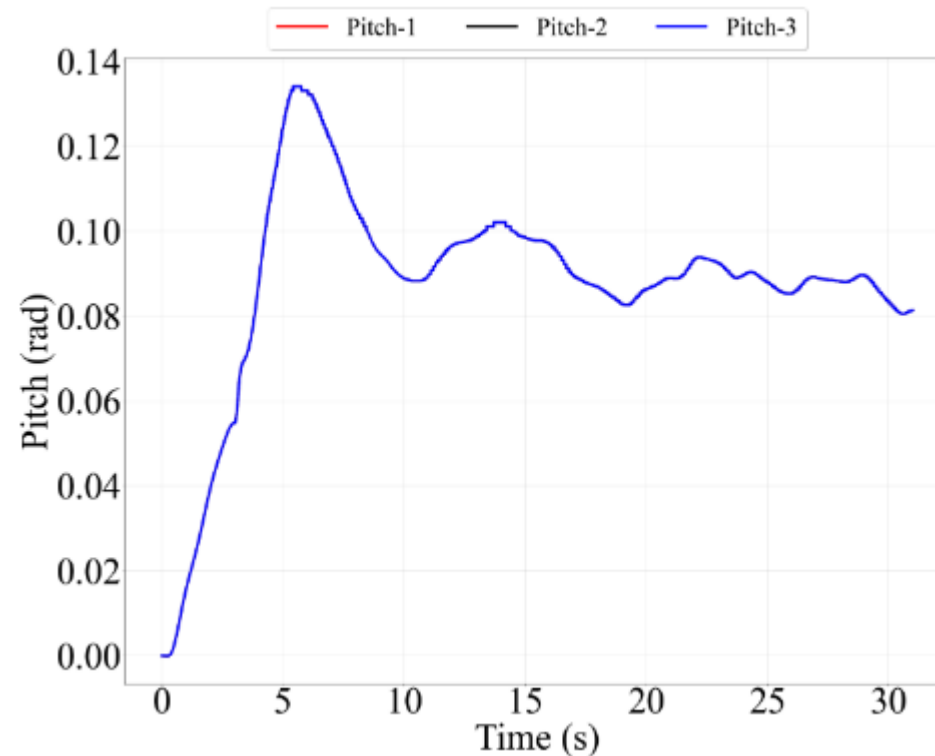
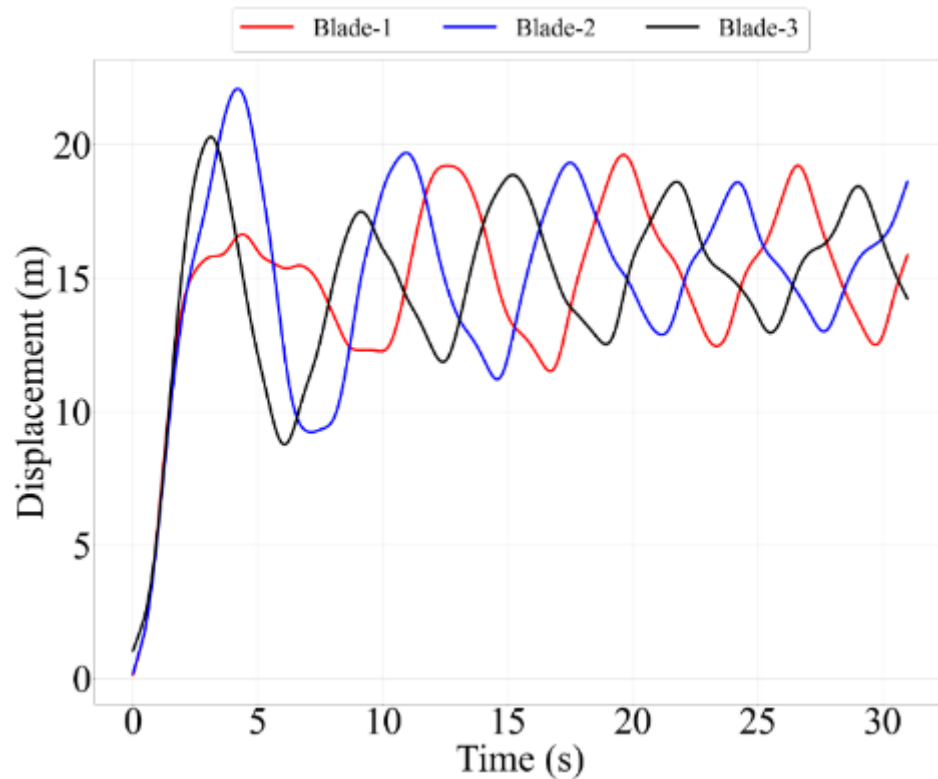
Power



Thrust

### 3) Viento variable 15 m/s

- Ángulo de pitch: oscilante en torno a los 5,15 grados (fijado por el control).
- Palas deformadas por la presión del viento y la gravedad. Desplazamiento máximo de la punta 15 m.
- Se observa comportamiento influenciado por variaciones del viento.



# Siemens 2.3 MW

<b>Rating</b>	<b>2.3 MW</b>
<b>Rotor Orientation, Configuratio</b>	Upwind, 3 Blades
<b>Control</b>	Variable Speed, Collective Pitch
<b>Rotor, Hub Diameter</b>	93 m, 3 m
<b>Hub Height</b>	90 m
<b>Cut-In, Rated, Cut-Out Wind Speed</b>	3 m/s, 10.9 m/s, 25 m/s
<b>Cut-In, Rated Rotor Speed</b>	6.9 rpm, 16 rpm
<b>Overhang, Shaft Tilt, Precone</b>	4 m, 6°, 2.5°
<b>Rated Rotor Speed</b>	16 rpm
<b>Rated Generator Speed</b>	1456 rpm
<b>Gearbox Ratio</b>	91 :1
<b>Electrical Generator Efficiency</b>	95.2 %
<b>Rated Generator Torque</b>	15726.93 Nm



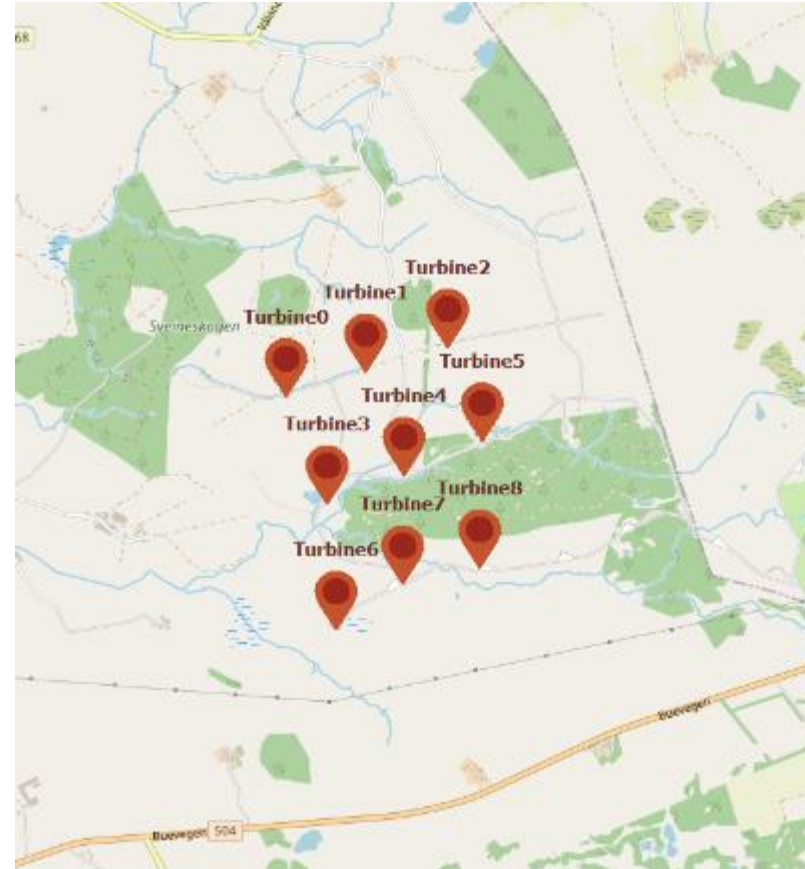
X-Plan  
Ingeniería Colaborativa

Expert Partner  
Digital Industries Software



# Análisis

- Parque eólico de Høg-Jæren (<https://www.vindenergi.no/projects/hog-jaeren>): 32 aerogeneradores con una capacidad total de 73 MW y una producción anual de 230 GWh.
- Aerogeneradores número 1 y 4 del parque seleccionados para análisis del comportamiento de la turbina



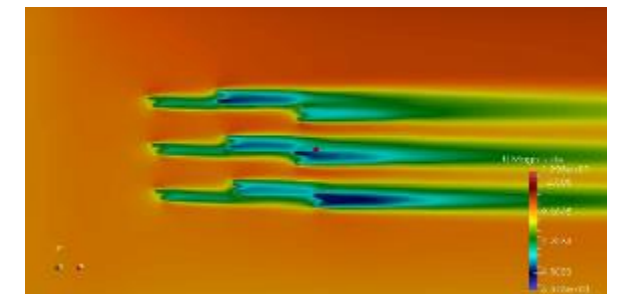
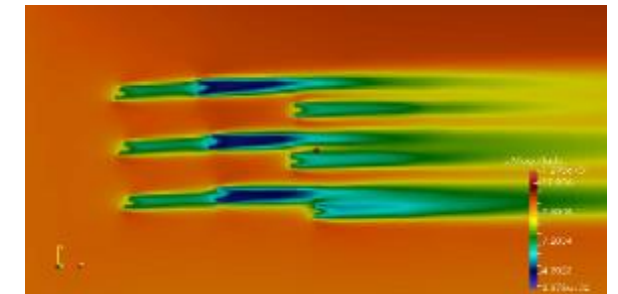
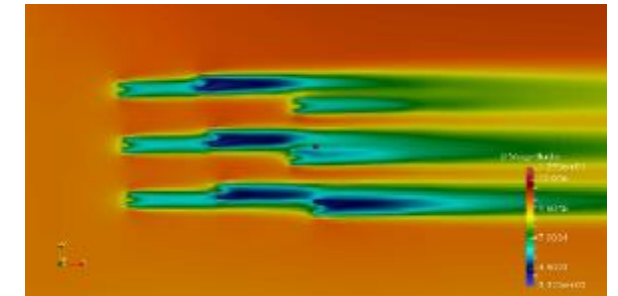
Subset of 9 turbines of the Høg-Jæren Wind Farm

X-Plan  
Ingeniería Colaborativa

Expert  
Partner

SIEMENS

Digital Industries Software



Flow conditions for three yaw settings. Top: 270° / Medium: 295° / Bottom: 240°



# Análisis

Dos análisis con viento variable NE:

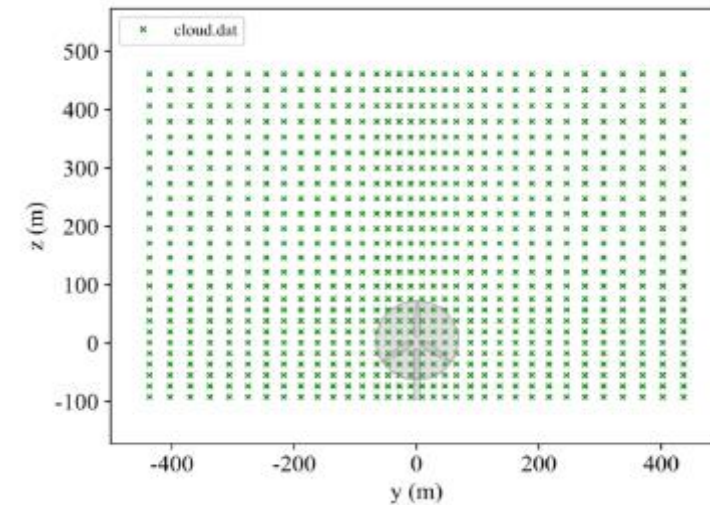
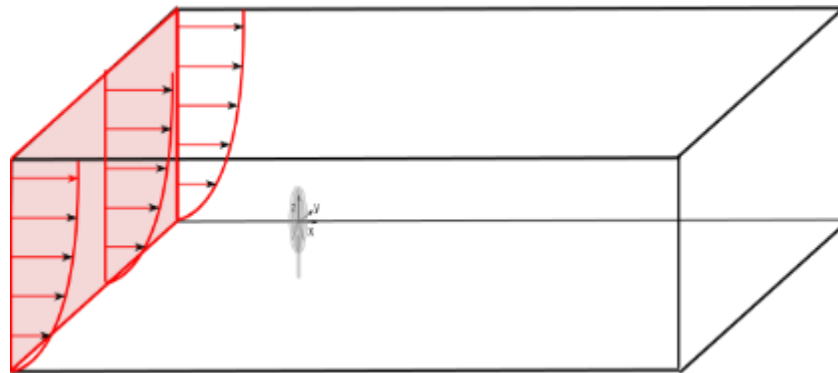
- 1) Turbina 1
- 2) Turbina 4

Viento :

- CFD del parque eólico simulado, partiendo de condiciones atmosféricas
- Información transferida a la entrada por *userlib*

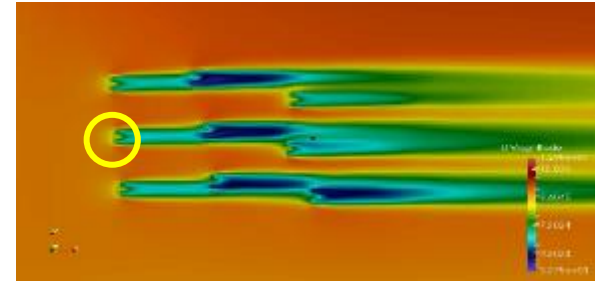
Co-simulación fluido-estructural en cluster:

- Paso de tiempo de 0,02 s, espaciado espacial en zona rotor 0,2 d
- Interpolación espacial y temporal de bajo orden (vecino más cercano y vecino lineal, respectivamente)



# Turbina 1

En primera fila. Perfil incidente no afectado por WT  
aguas arriba. La velocidad media es de 10,5 m/s

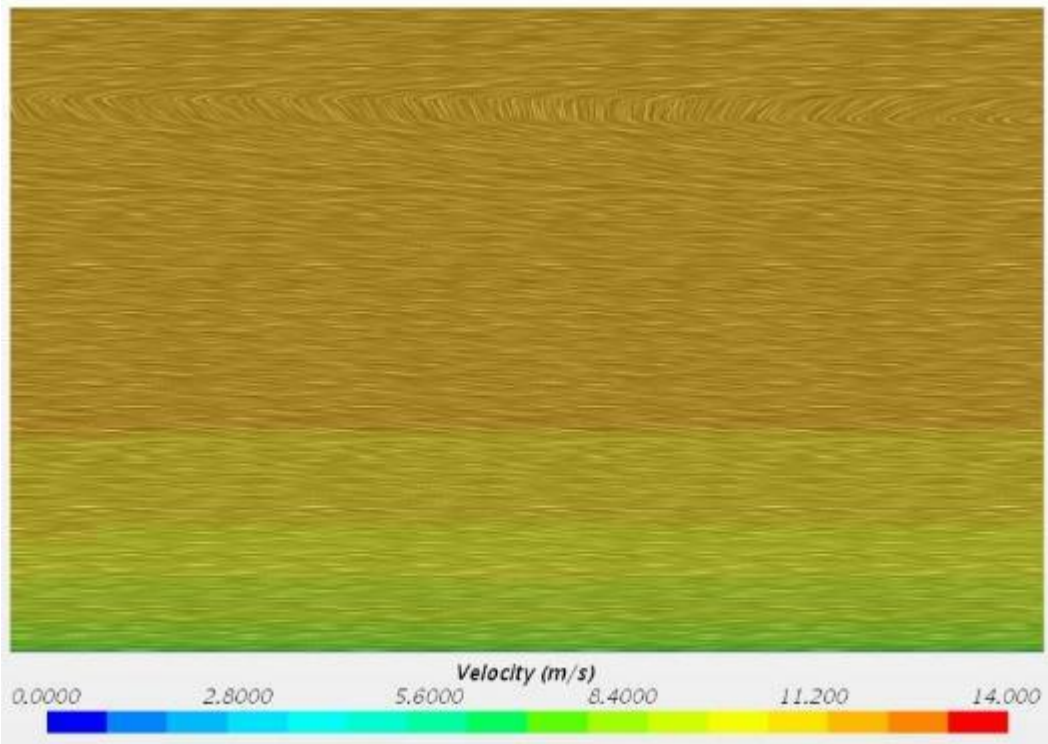


X-Plan  
Ingeniería Colaborativa

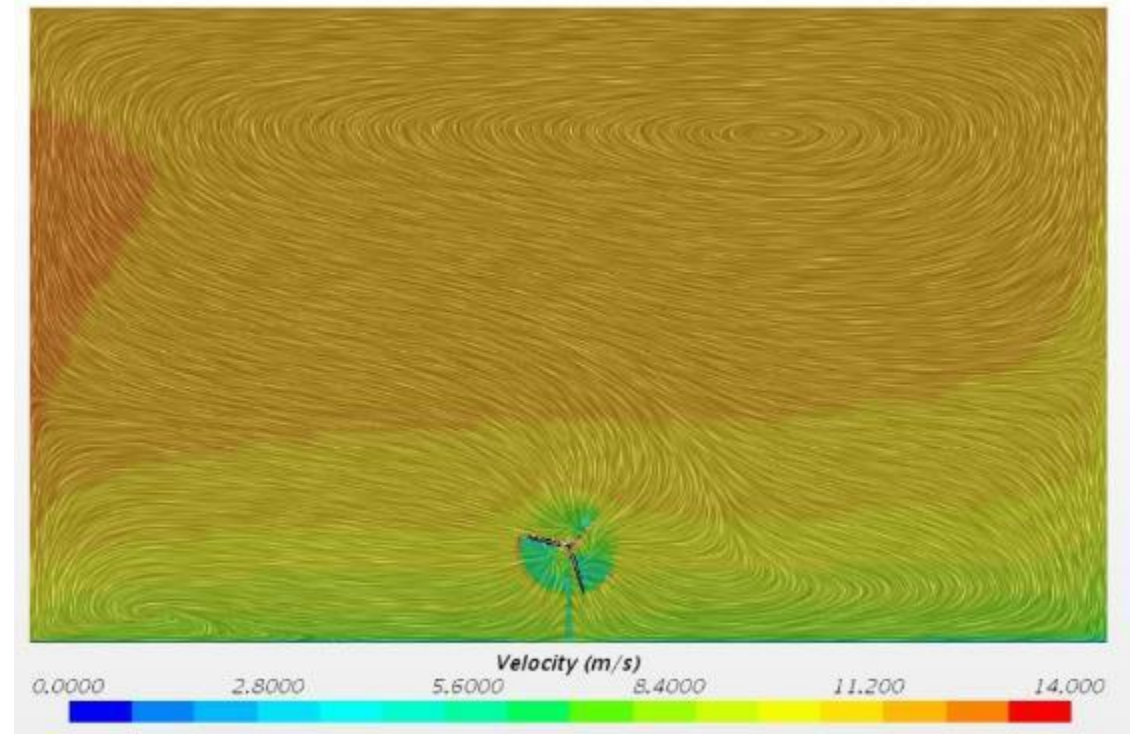
Expert  
Partner

Digital Industry Software

SIEMENS



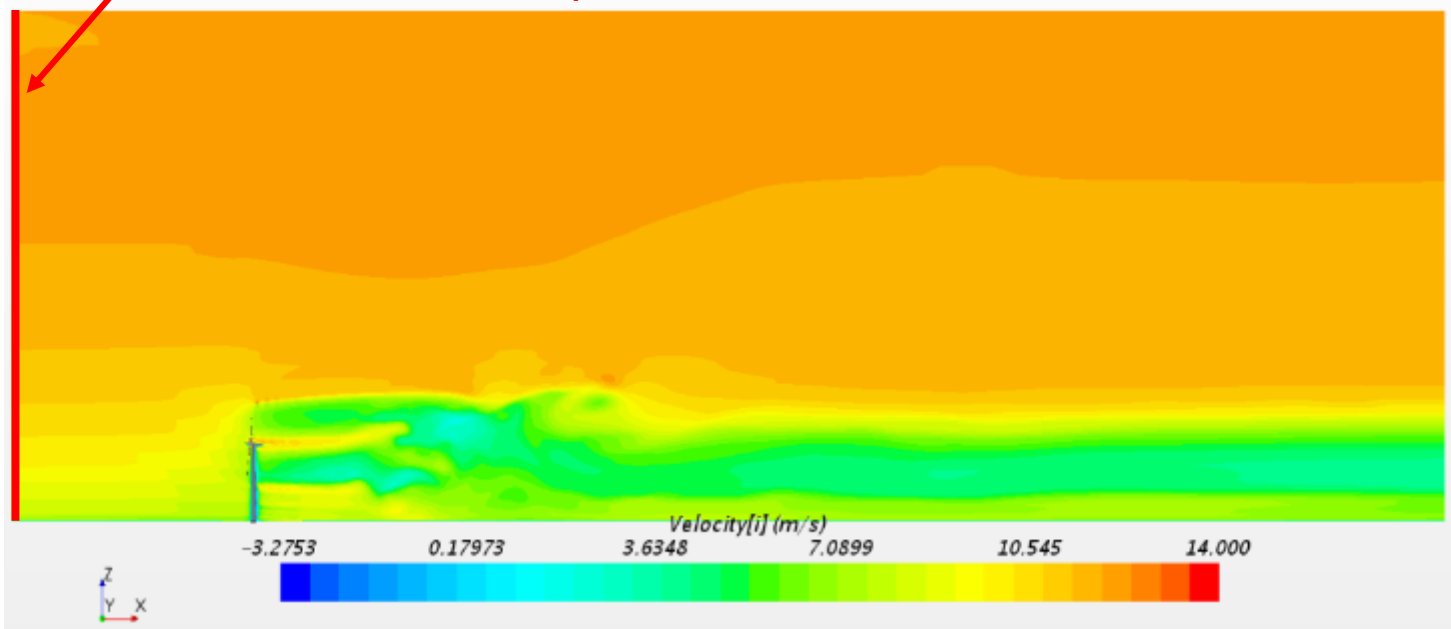
Snapshot of the inlet velocity field at 60s (front view).



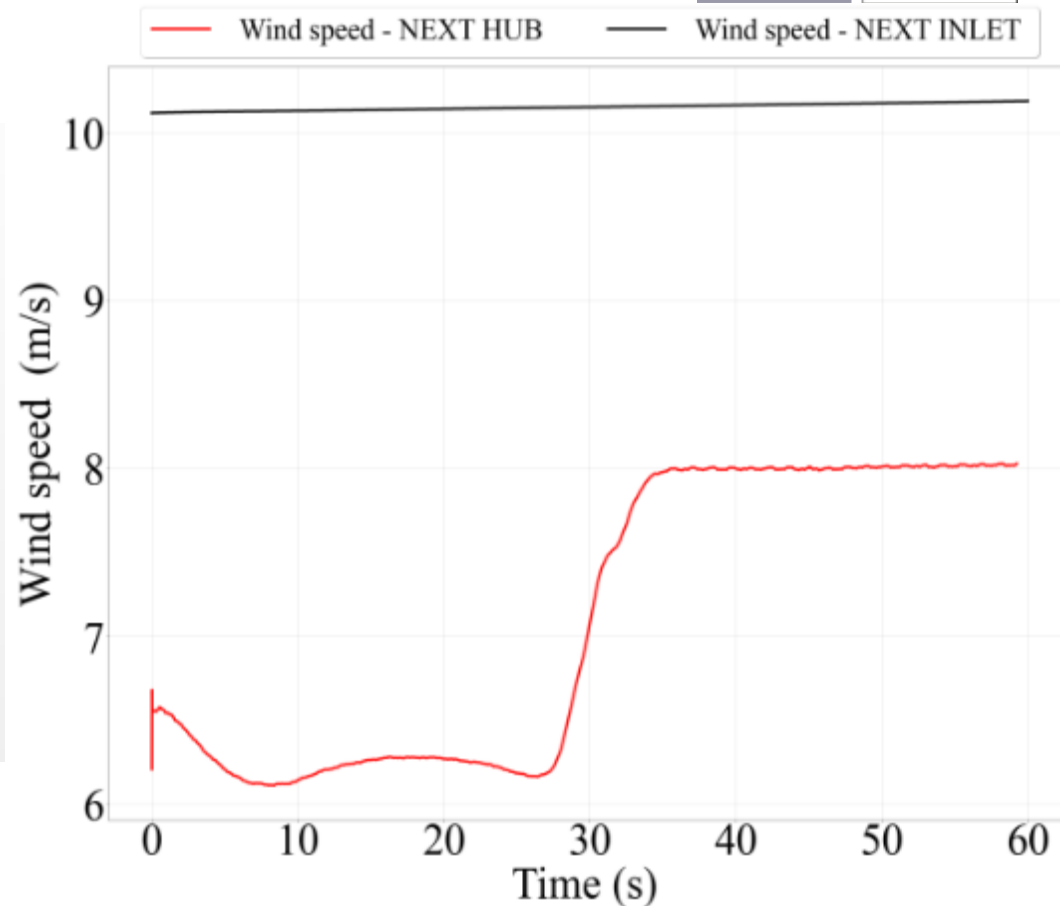
Snapshot of the velocity field in front of the WT at 60s (front view).

# Turbina 1

Inlet variable wind speed from WP2

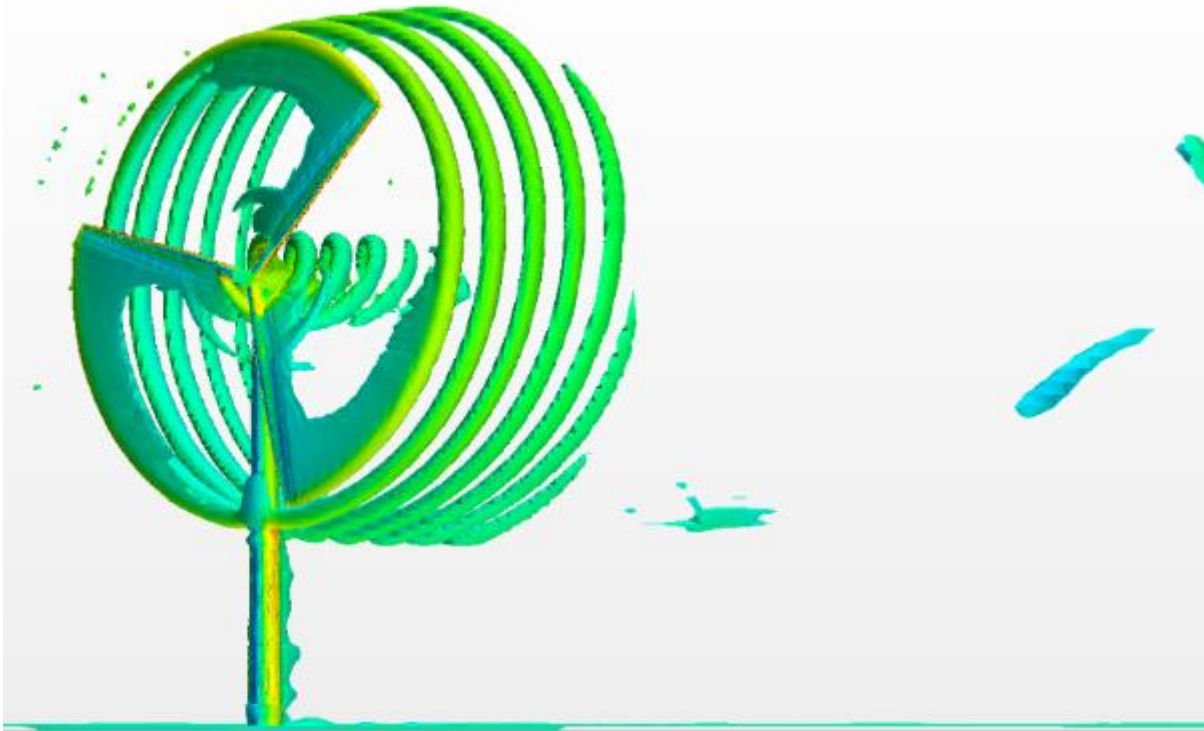


Snapshot of the velocity field at 60 s (lateral view).

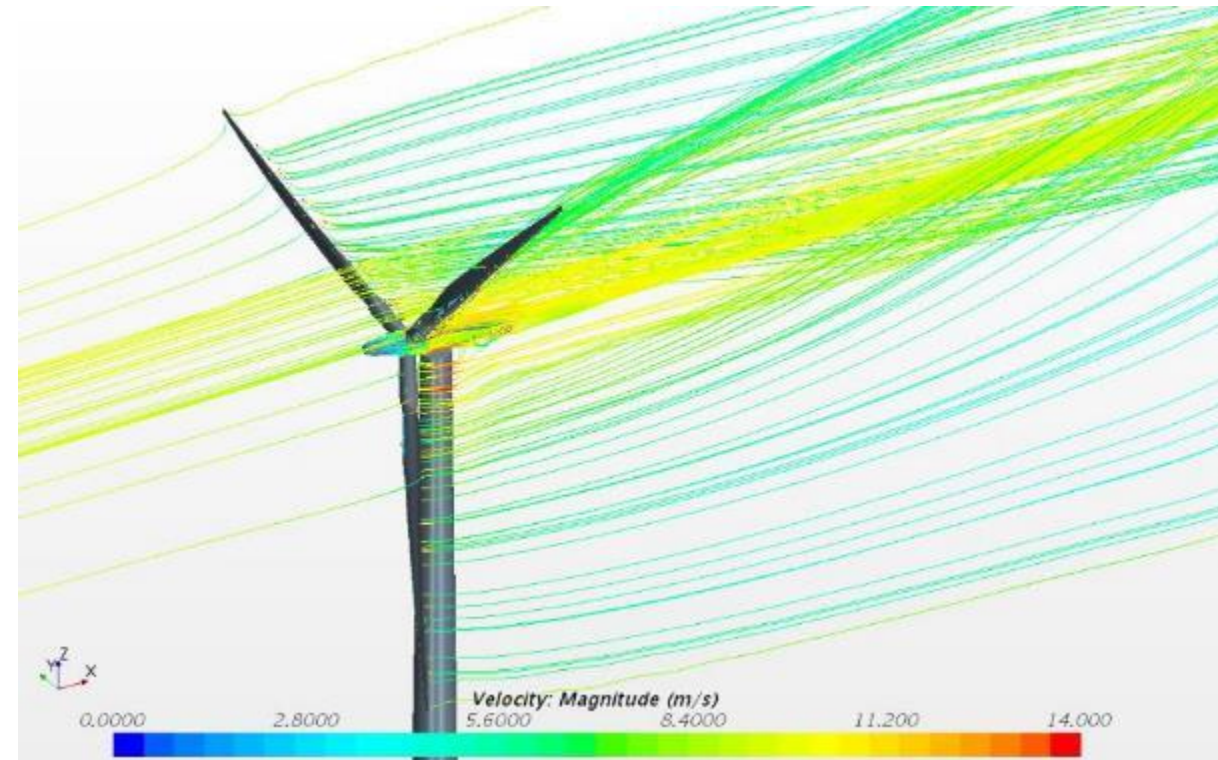


Wind speed next to hub and at inlet, in front of WT

# Turbina 1



Detail of turbulence structure (Q criterion) induced by WT1

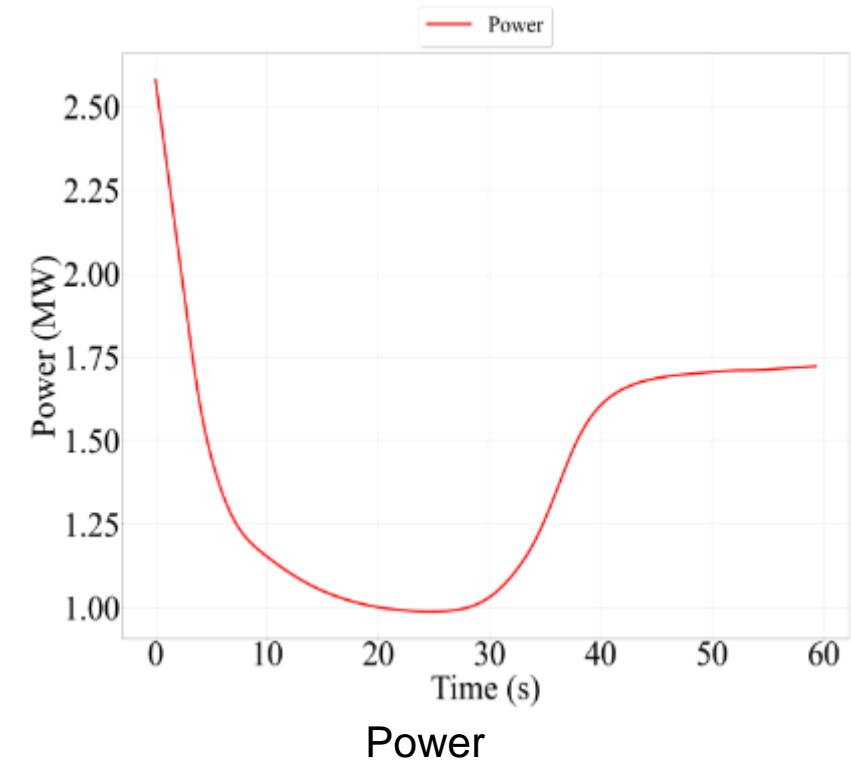
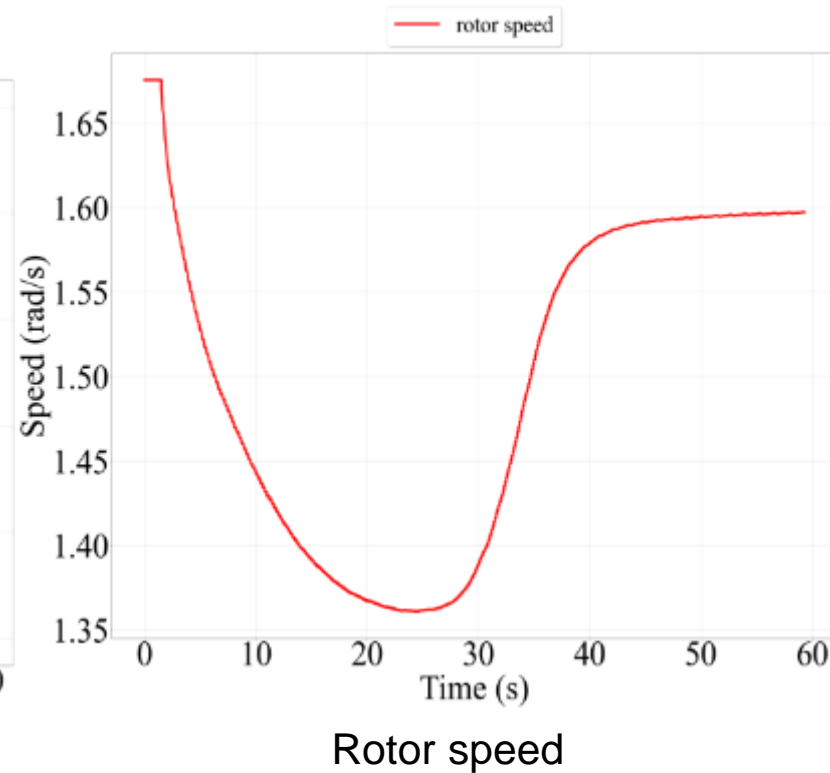
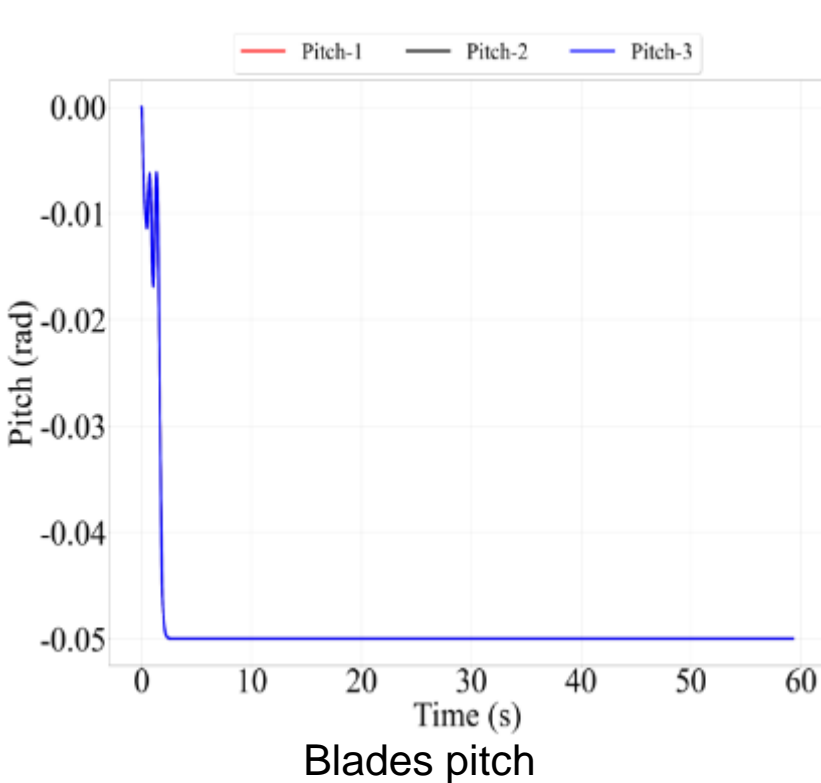


Detail of streamlines at WT1

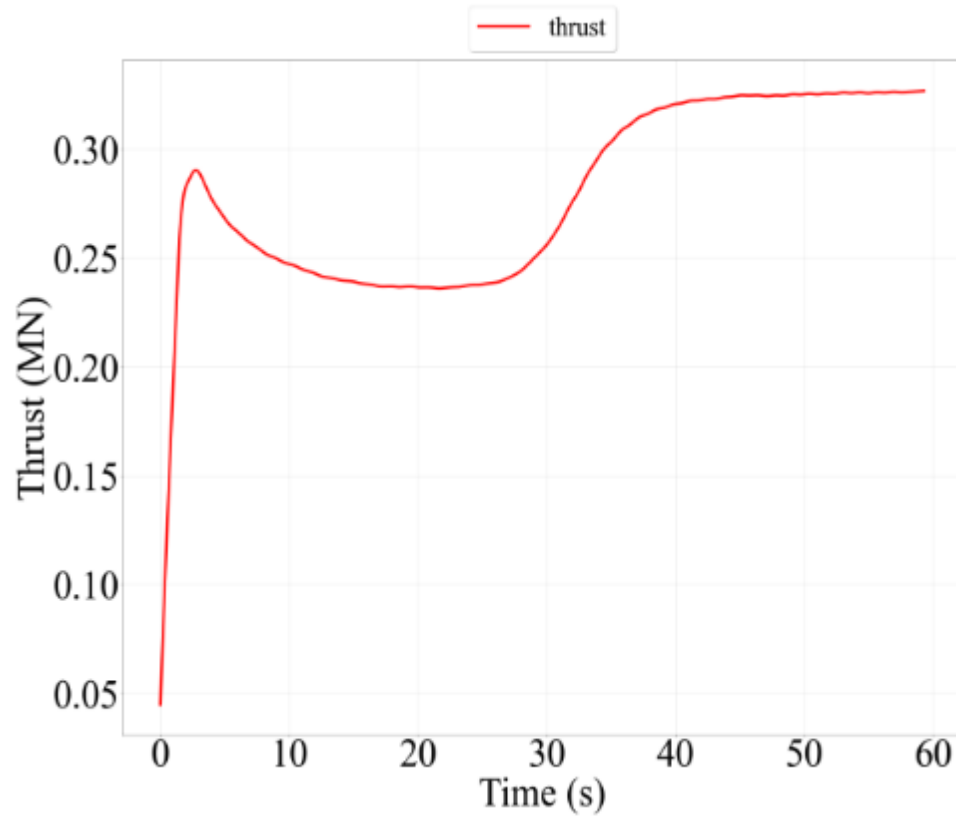


# Turbina 1

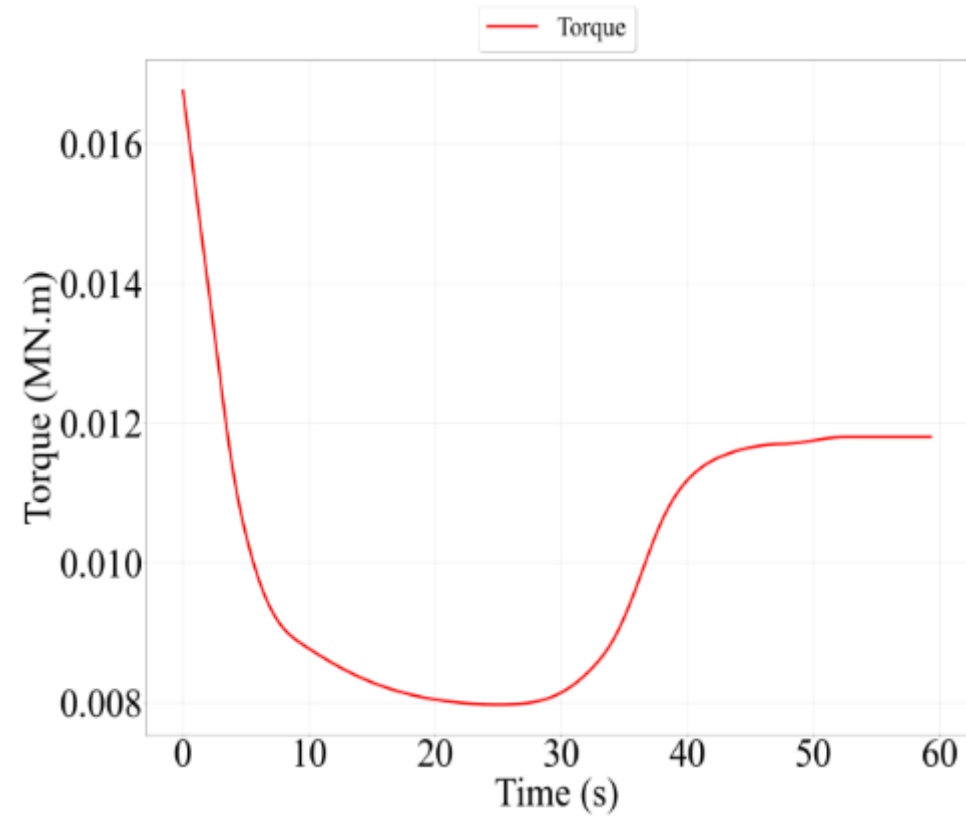
- El control cambia el ángulo de pitch de las palas hasta el mínimo.
- Corresponde a máxima demanda de la WT, alcanzando un funcionamiento estable.
- Velocidad media del rotor es de 1,60 rad/s (referencia nominal 1,67 rad/s)



# Turbina 1



Thrust

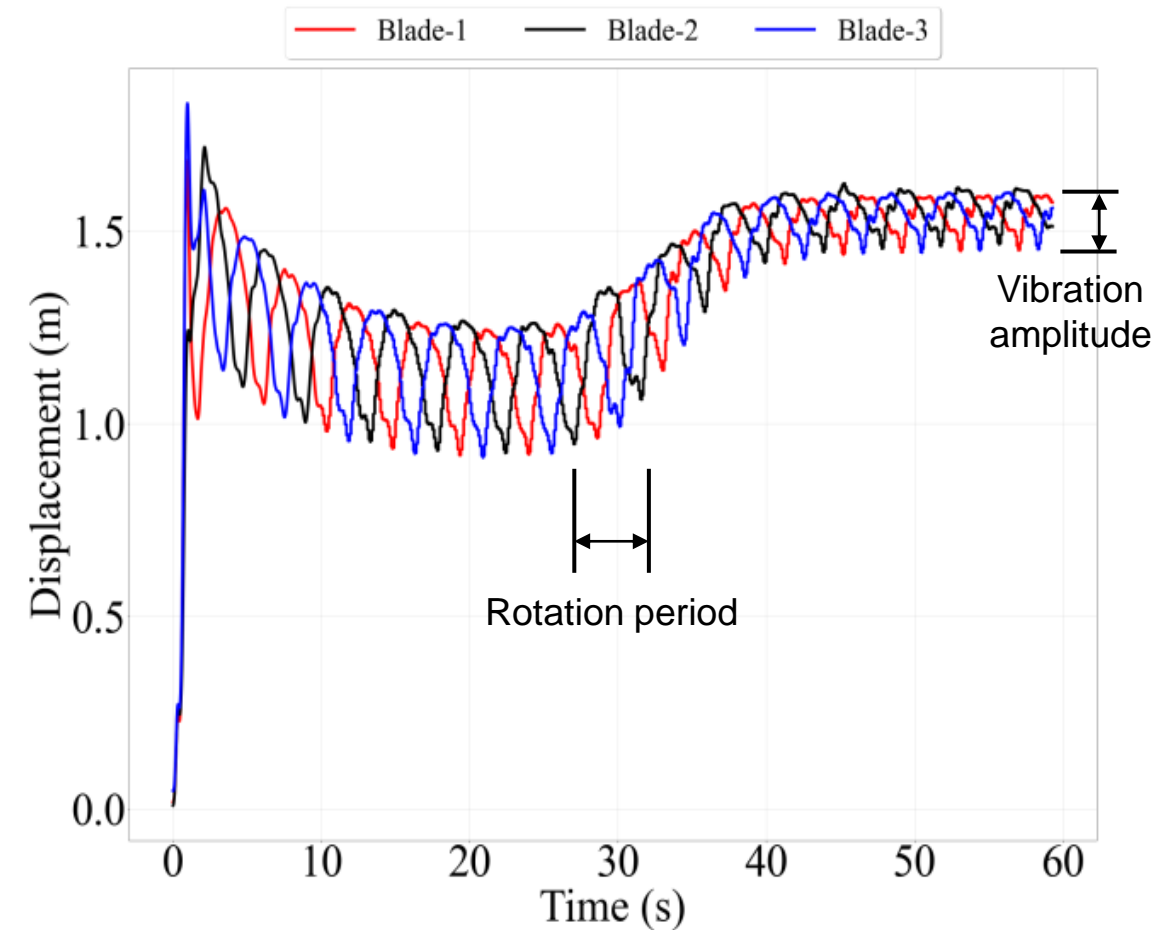


Torque



# Turbina 1

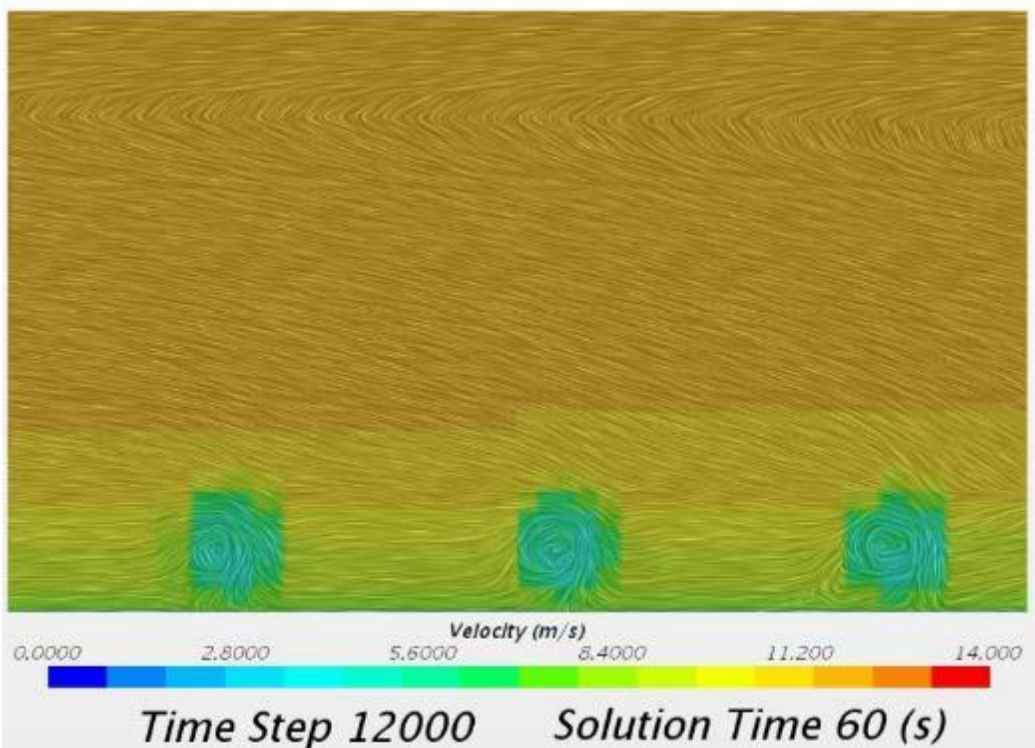
- Desplazamiento palas máximo 1,5 m.
- Amplitud de vibración 0,15 m.
- Oscilaciones de alta frecuencia perceptibles cuando las palas alcanzan la posición superior
- Desplazamiento mínimo al pasar por la torre



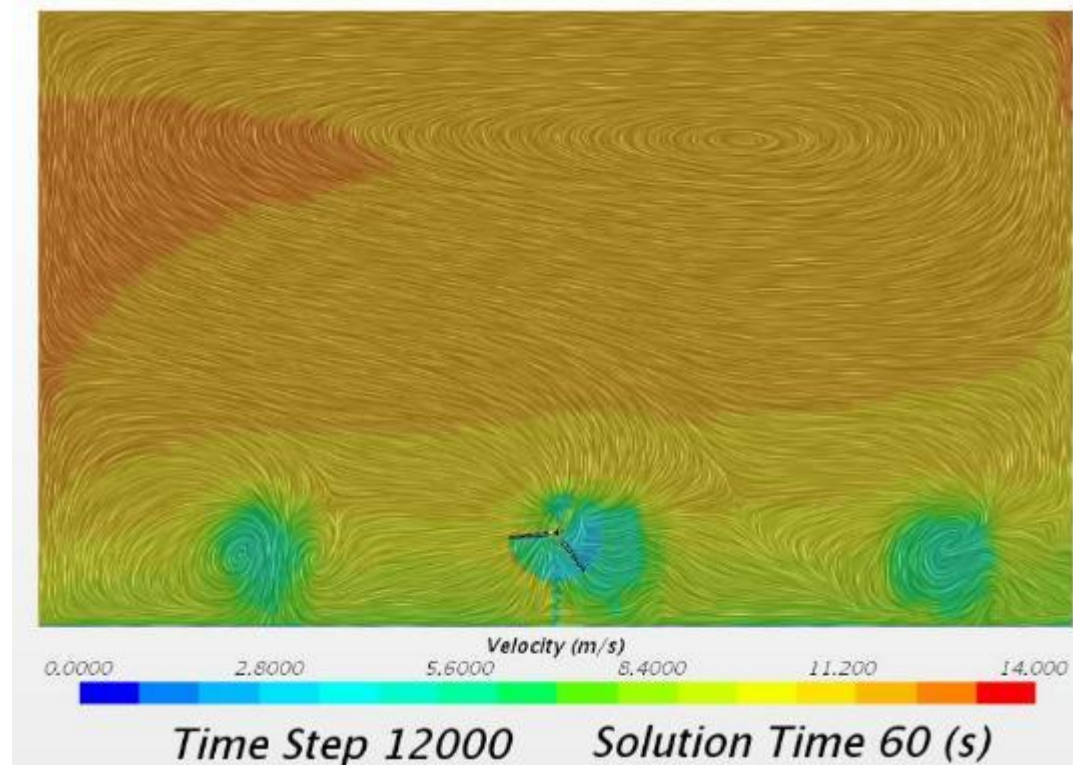
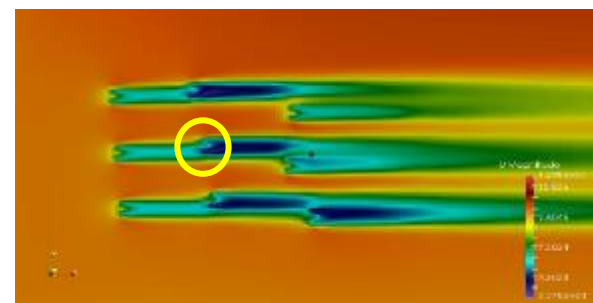
Blades tip displacement

# Turbina 4

En segunda fila. Perfil incidente **afectado** por WT aguas arriba. La velocidad media es de 7 m/s



Snapshot of the inlet velocity field at 60s (front view).



Snapshot of the velocity field in front of the WT at 60s (front view).

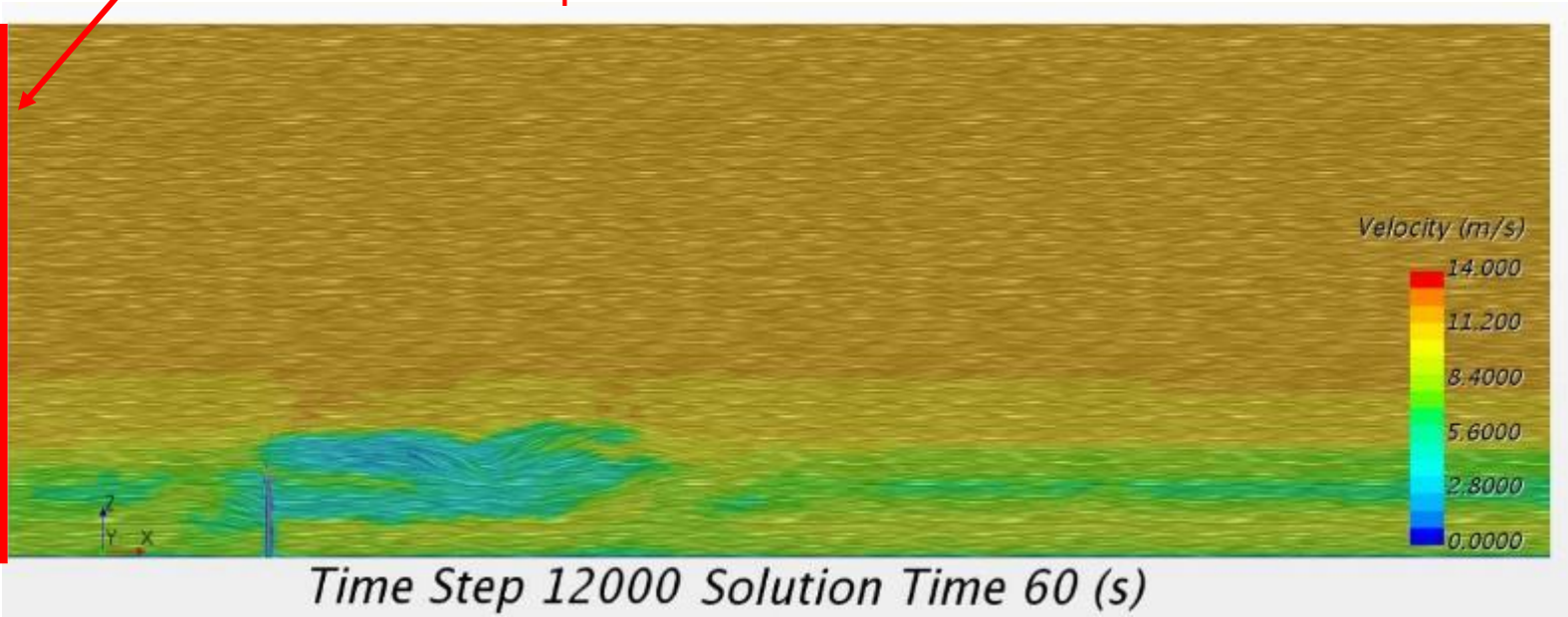
X-Plan  
Ingeniería Colaborativa

Expert  
Partner  
Digital Industry Software

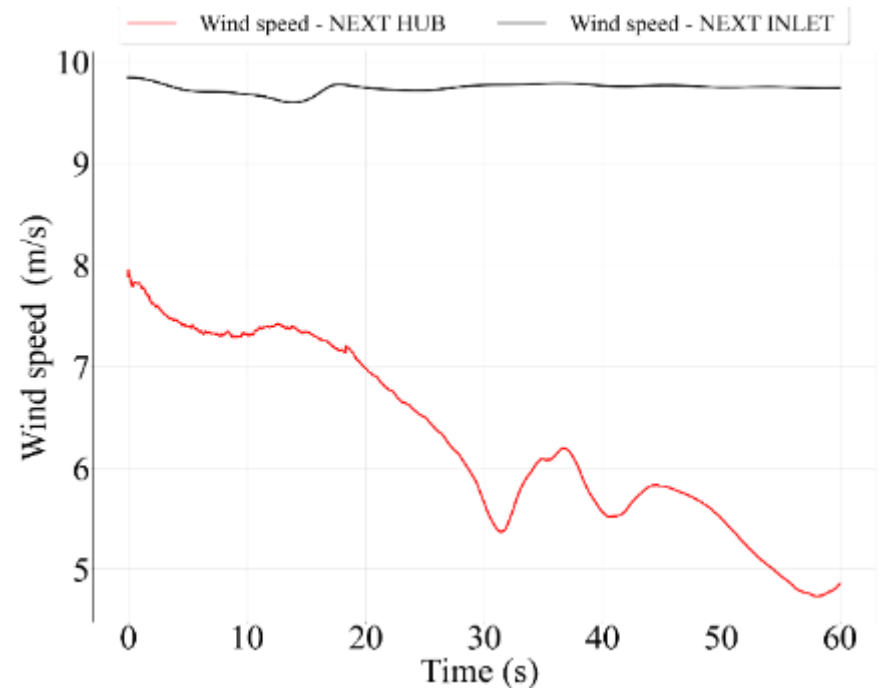
SIEMENS

# Turbina 4

Inlet variable wind speed from WP2



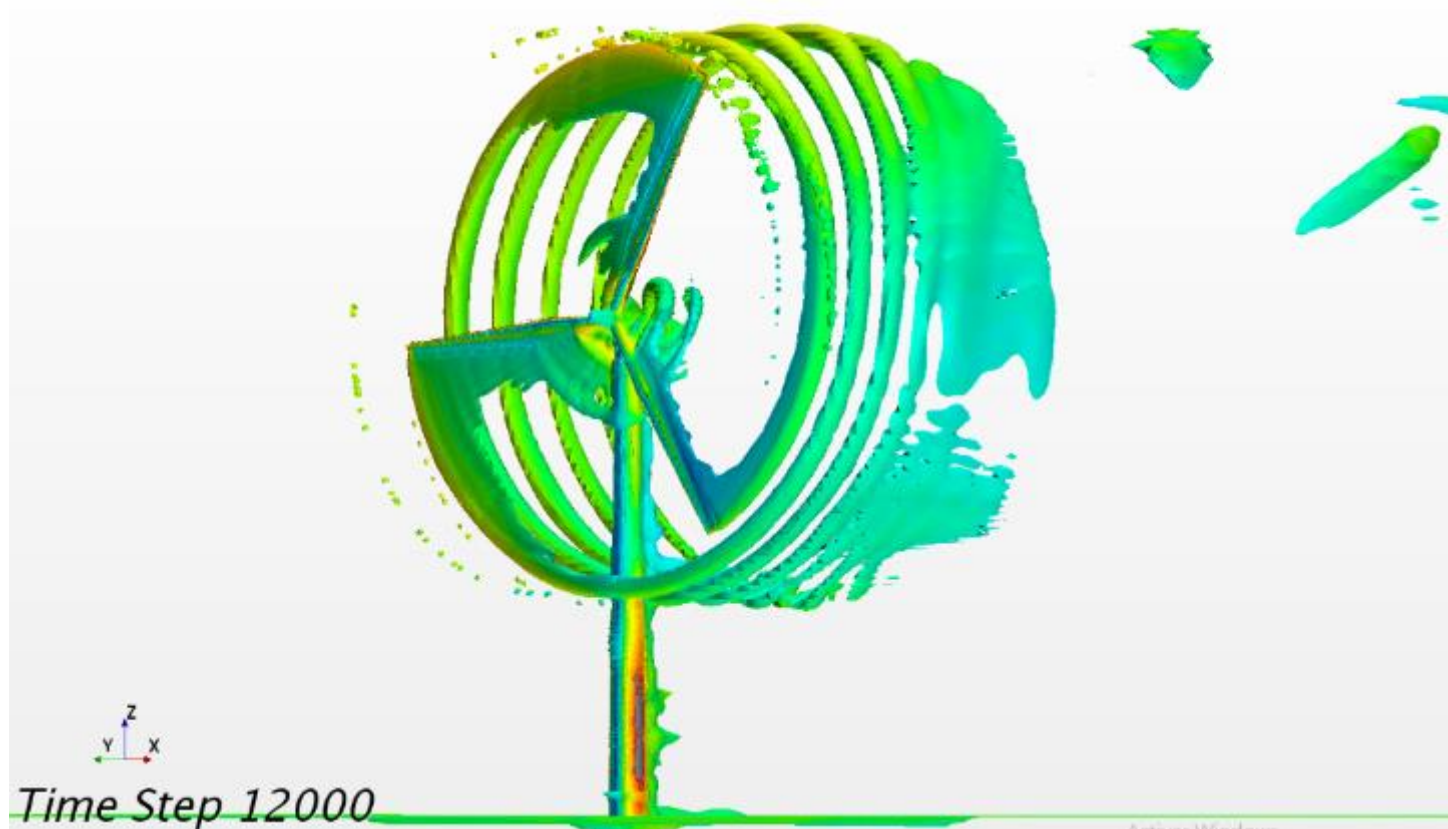
Snapshot of the velocity field at 60 s (lateral view).



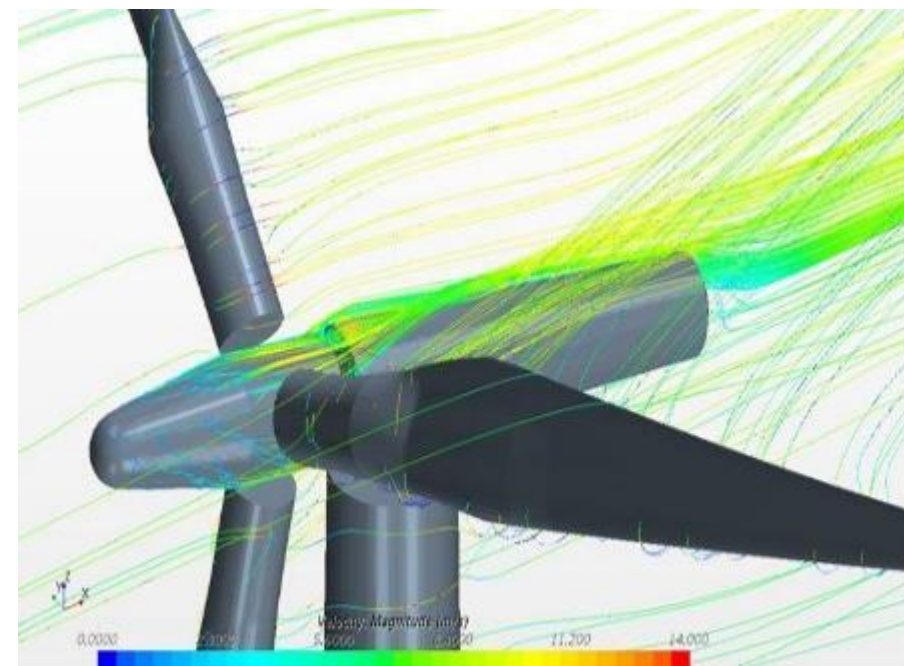
Wind speed next to hub and at inlet, in front of WT



# Turbina 4



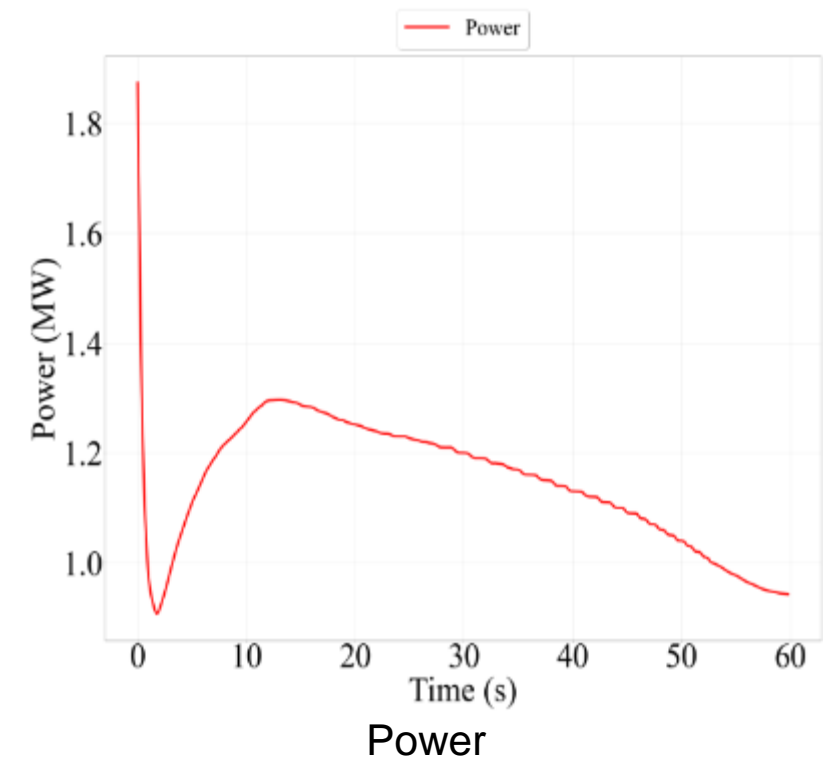
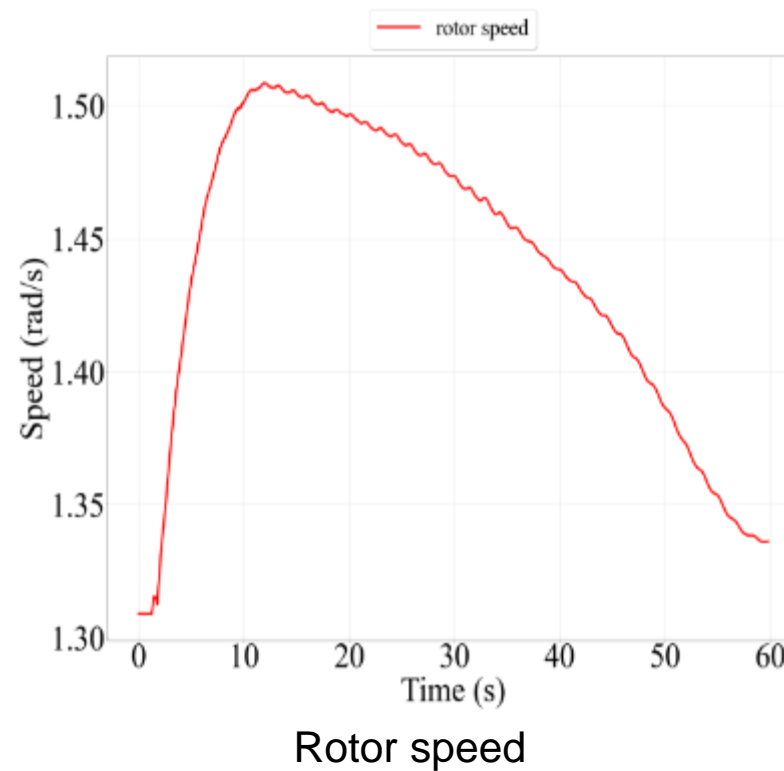
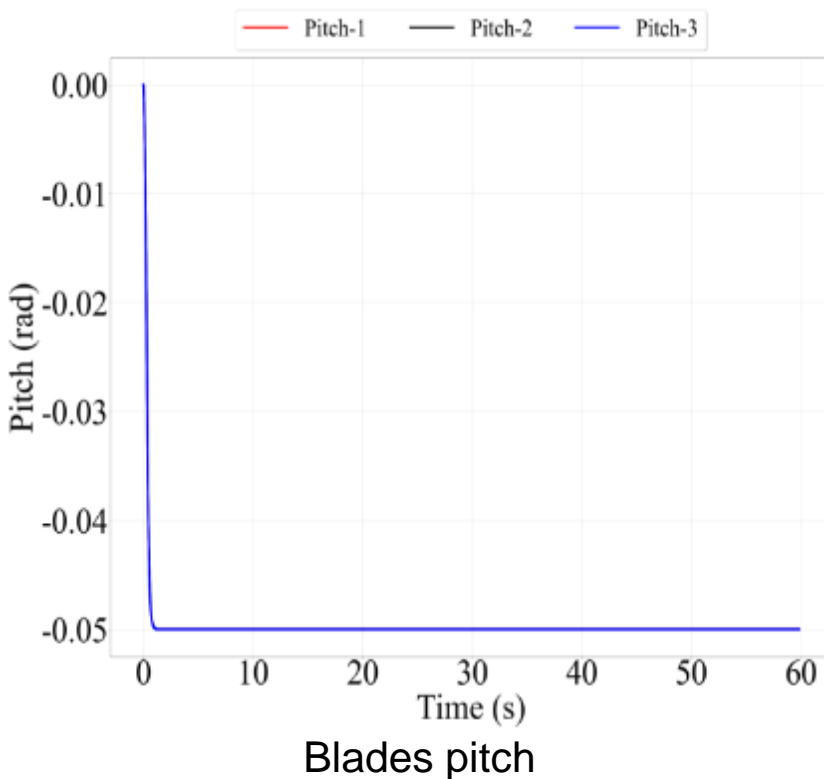
Detail of turbulence structure (Q criterion) induced by WT4.



Detail of streamlines at WT4.

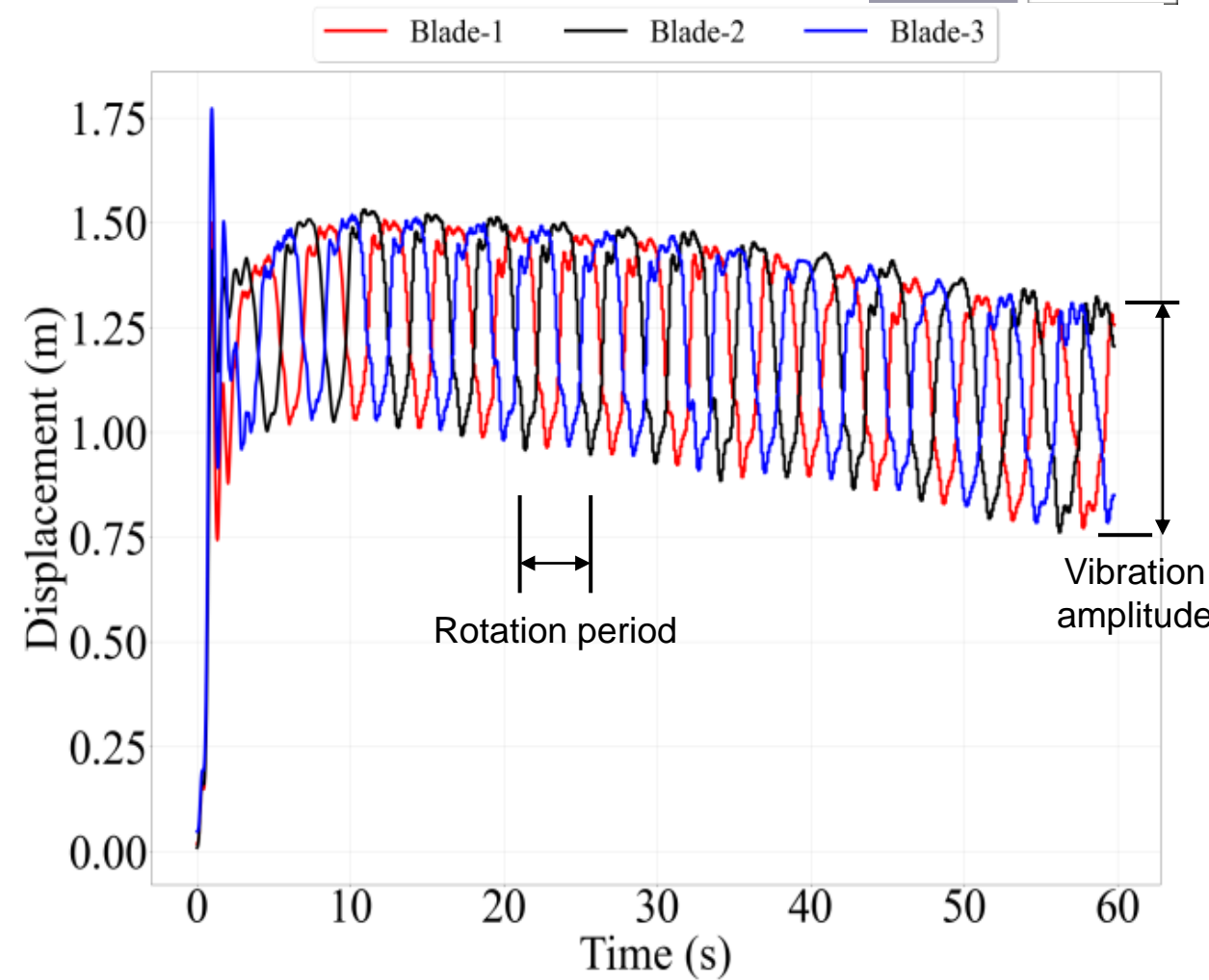
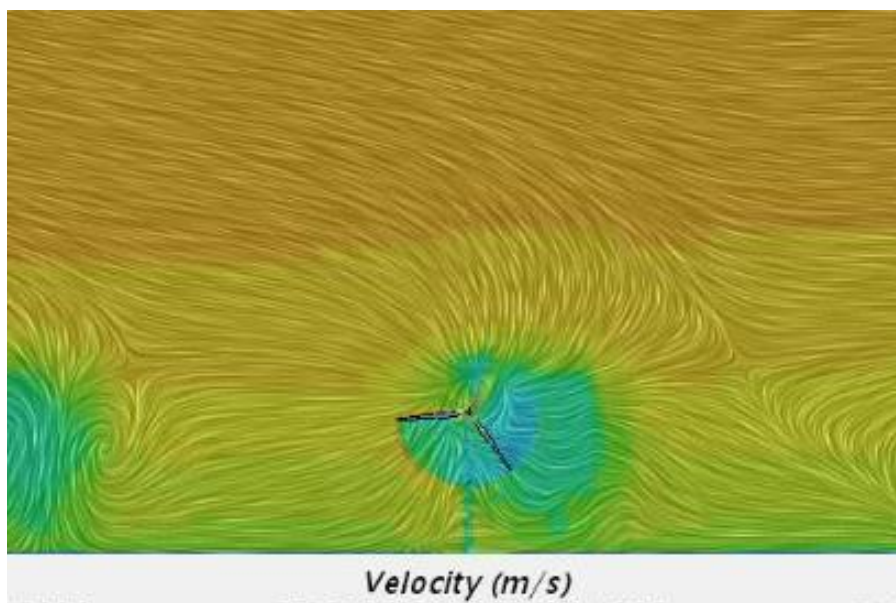
# Turbina 4

- El control cambia el ángulo de pitch de las palas hasta el mínimo.
- Sin embargo, no puede mantener las condiciones de funcionamiento previstas (velocidad del viento demasiado baja).



# Turbina 4

- Desplazamiento palas máximo 1,5 m.
- Amplitud de vibración 0,4 m (estela WT aguas arriba).
- Oscilaciones de alta frecuencia perceptibles cuando las palas alcanzan la posición superior
- Desplazamiento mínimo al pasar por la torre



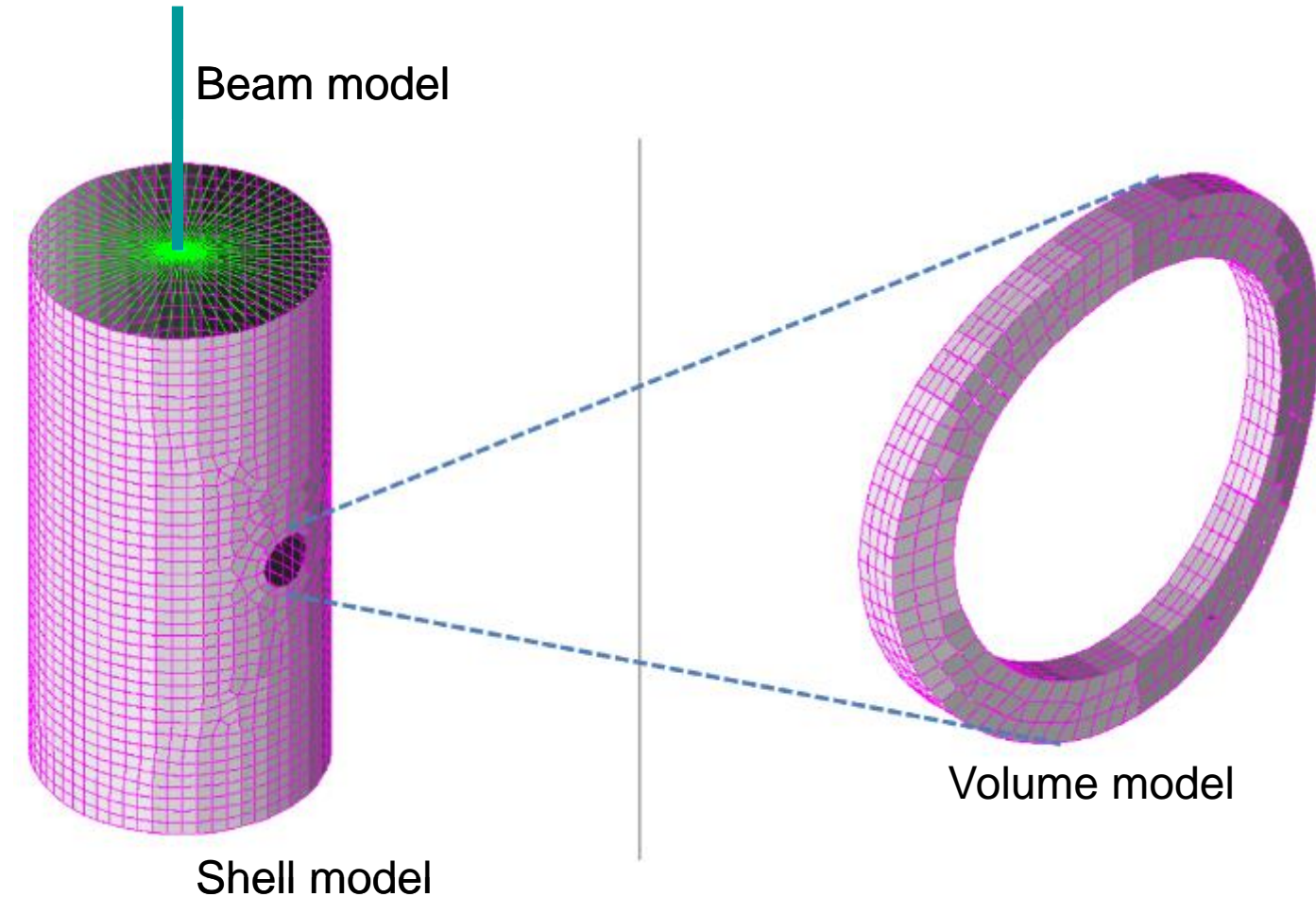
Blades tip displacement



# Cálculo de Tensiones: del Modelo Global al Modelo Local

## Submodelado :

- Modelo de vigas de la WT completa
- Extracción de cargas o cinemáticas en algunas secciones de la viga
- Cargas/cinemáticas aplicadas a modelo 3D (shell)
- Submodelado (ZOOM) para transferir cargas del modelo 3D a modelo detallado con degradación de los compuestos



## Submodelado en SAMCEF

Comparación entre un enfoque monolítico y el enfoque de submodelado

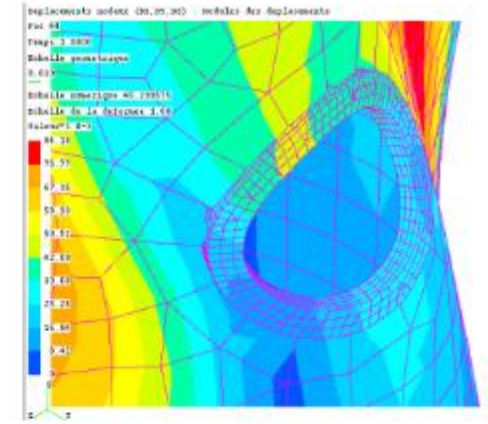
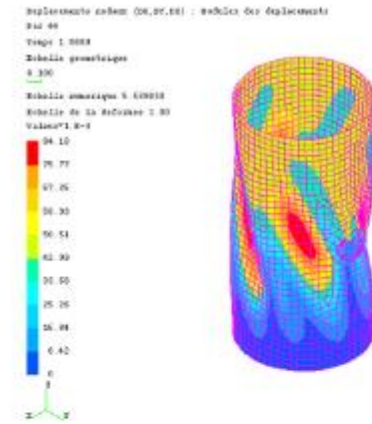
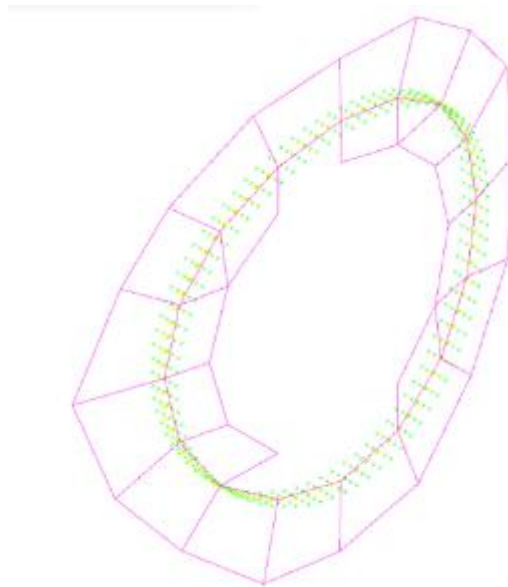


Figure 31: monolithic model with gluing

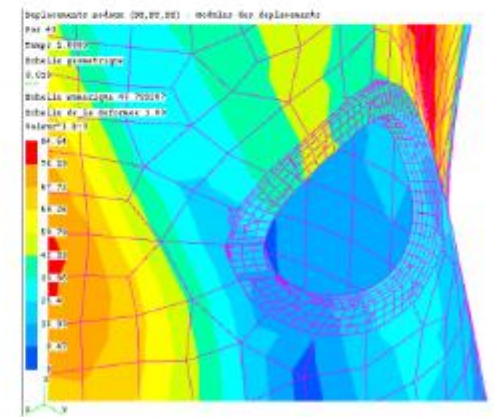
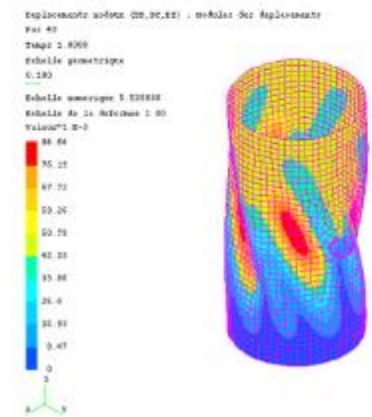
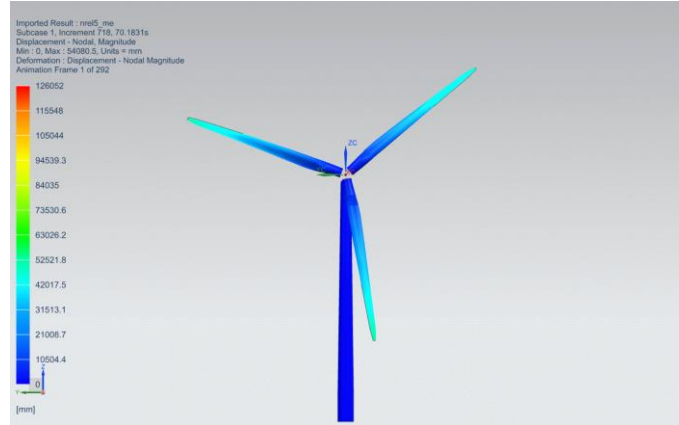


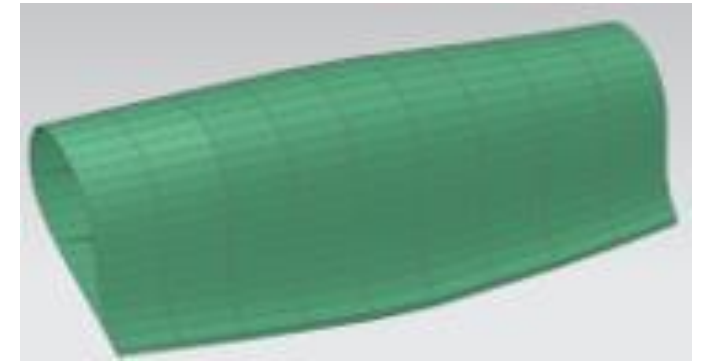
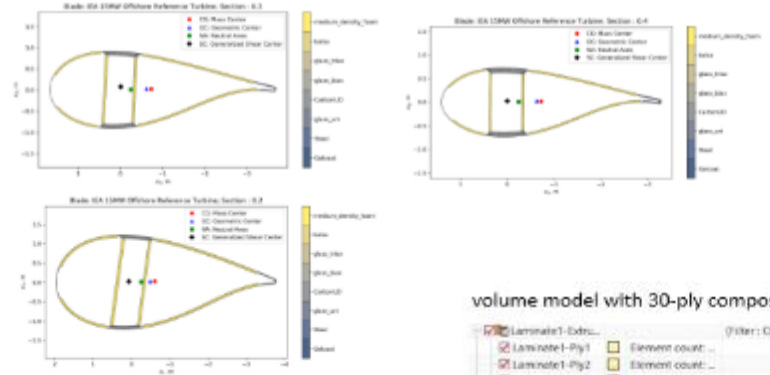
Figure 32: structural zoom recombined model

# Cálculo de Tensiones: del Modelo Global al Modelo Local

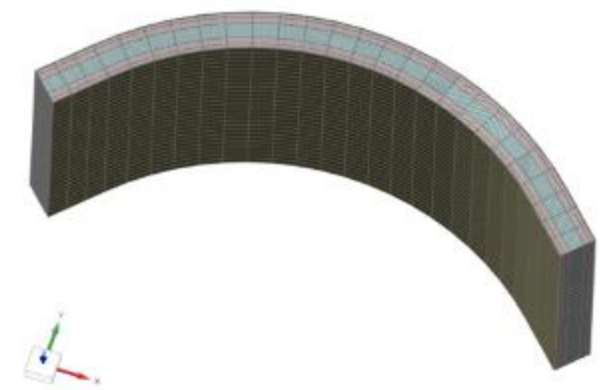
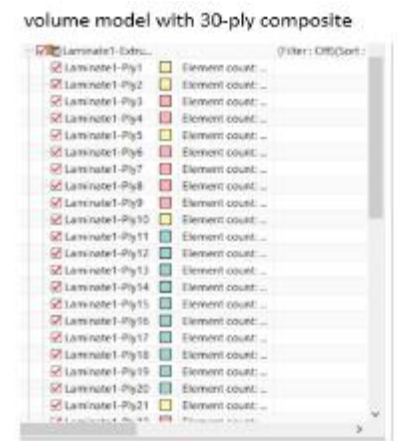
Modelo global del aerogenerador



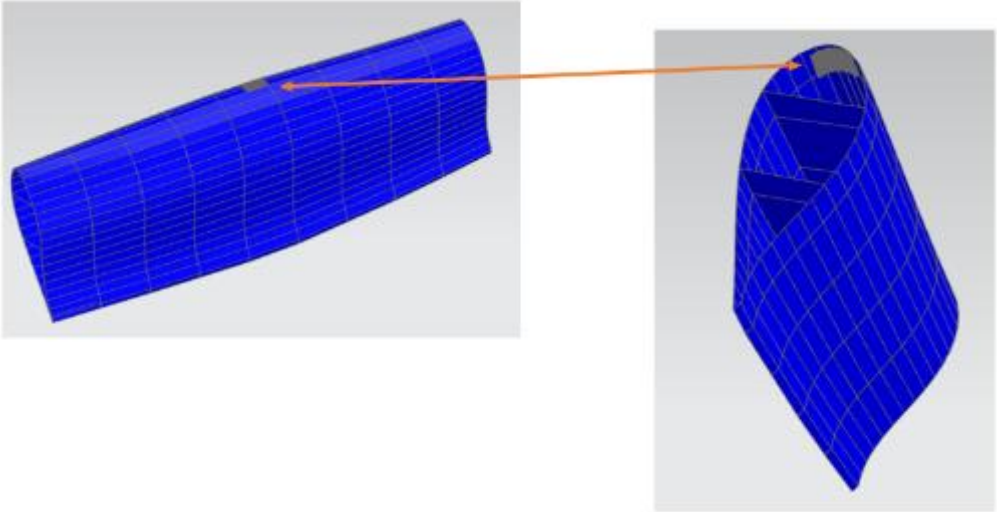
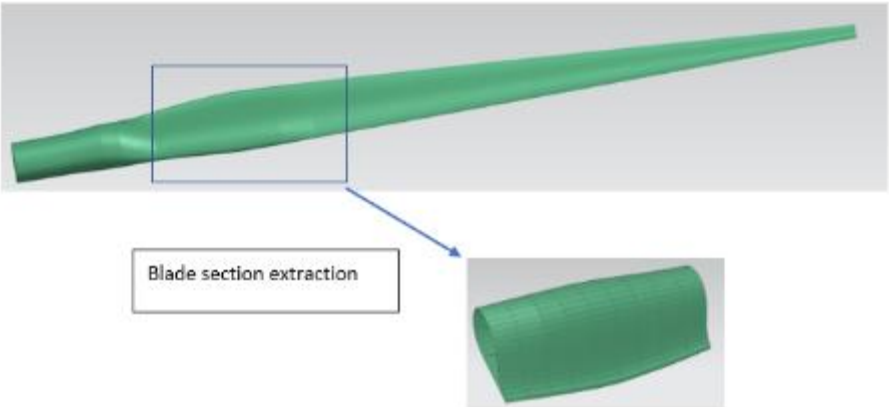
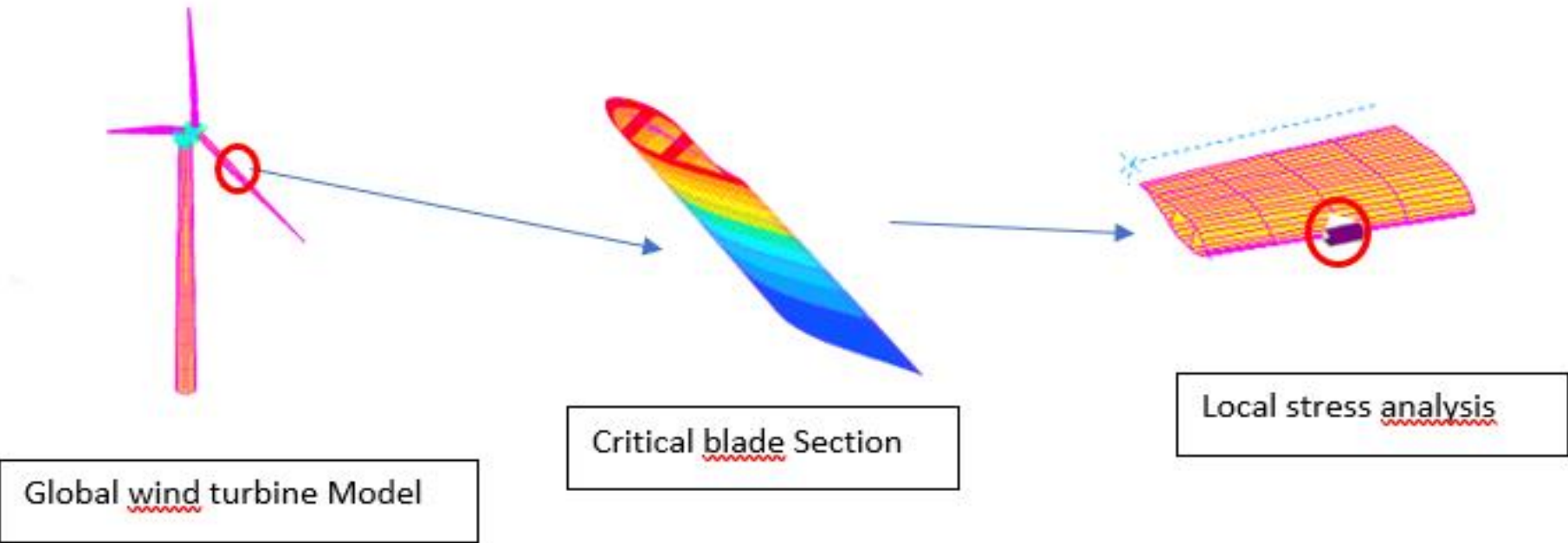
Modelo 3D de una sección de pala



Modelo detallado del compuesto en la pala para el análisis de tensión/fatiga

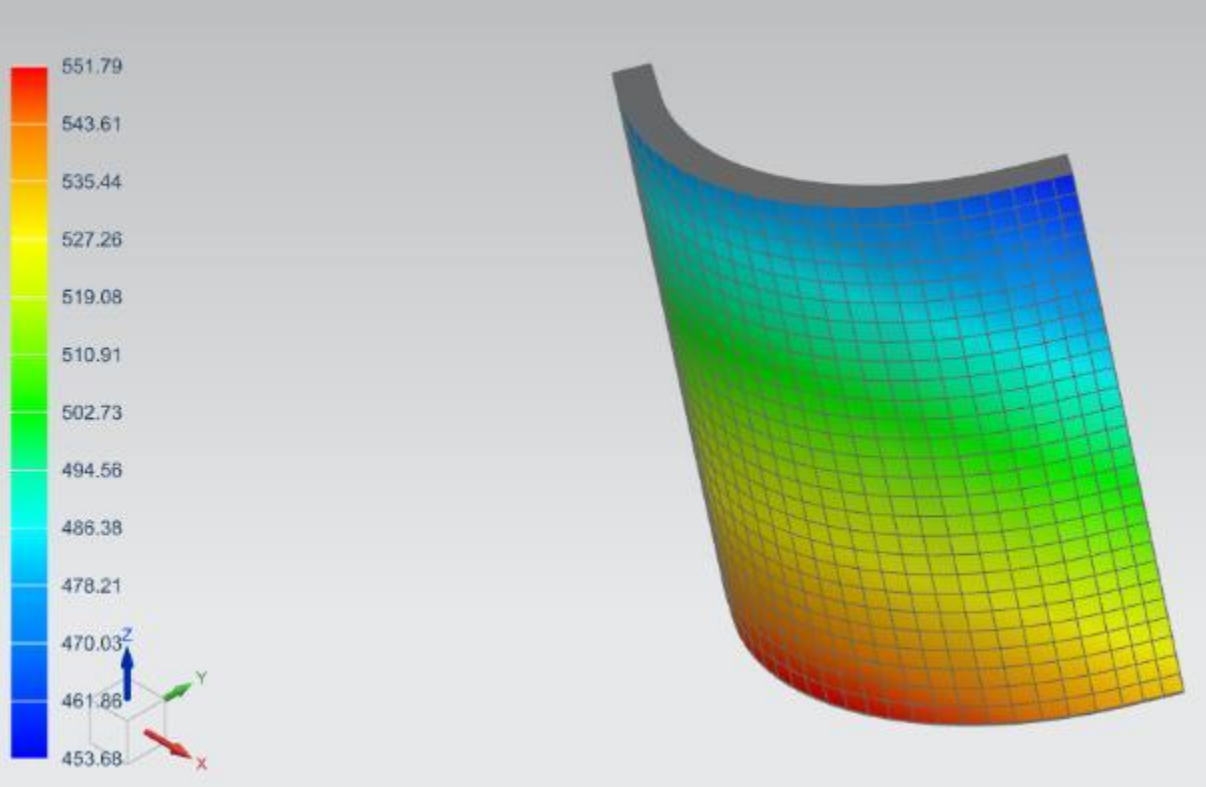


# Cálculo de Tensiones: del Modelo Global al Modelo Local

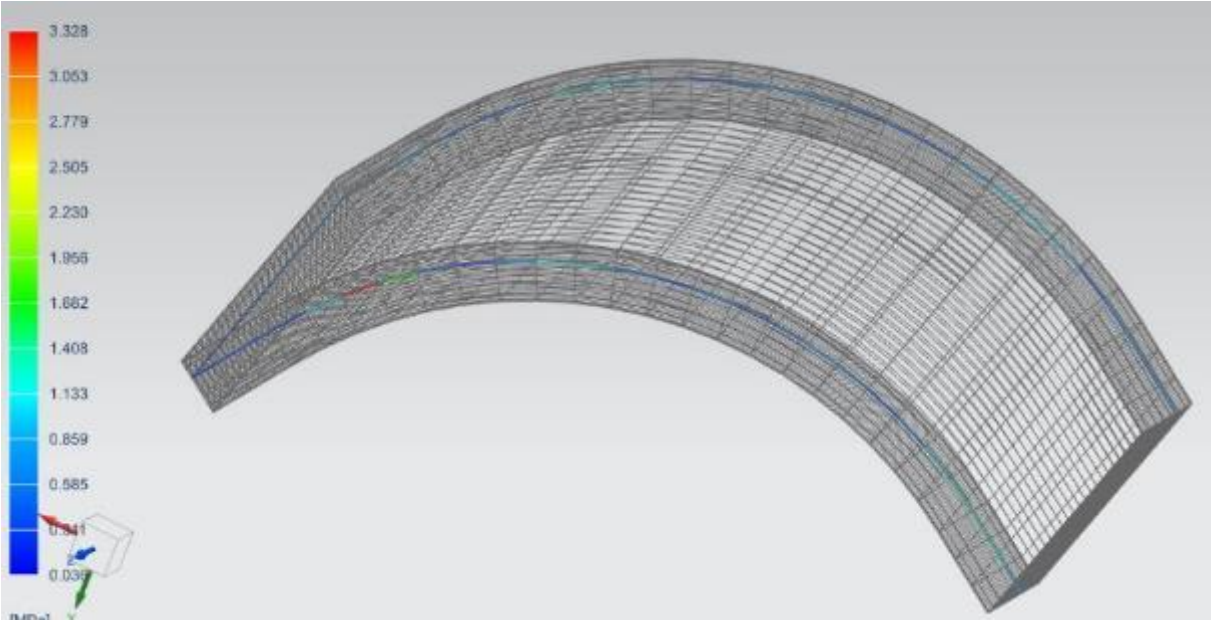




# Cálculo de Tensiones: del Modelo Global al Modelo Local



deformed local 3D model



Local Von Mises stress in ply 20

# 4. Conclusiones



# Conclusiones

- Se desarrolló una plataforma integrada para simulación de grandes turbinas eólicas
- Se desarrolló un cosimulador para acoplamiento de softwares StarCCM+ y Samcef-Mecano para aplicación general, utilizable en entorno de computación paralela (cluster)
- Se desarrolló una herramienta para generación de datos de turbinas eólicas
- Se desarrolló una herramienta para entrada de datos proveniente de la simulación del parque eólico
- Se desarrolló un procedimiento para conectar modelos globales de turbinas eólicas a modelos detallados del daño en el material compuesto
- Aplicaciones de demostración en varias turbinas eólicas